



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA FATIGA MUSCULAR Y LA PERCEPCIÓN
DEL ESFUERZO EN DIFERENTES PROTOCOLOS DE
ENTRENAMIENTO EN EL EJERCICIO DE SENTADILLA**

FRANCISCO TORRES LÓPEZ DE HARO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS DEL DEPORTE

AÑO 2022



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS DE LA FATIGA MUSCULAR Y LA PERCEPCIÓN
DEL ESFUERZO EN DIFERENTES PROTOCOLOS DE
ENTRENAMIENTO EN EL EJERCICIO DE SENTADILLA**

FRANCISCO TORRES LÓPEZ DE HARO

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS DEL DEPORTE

Conformidad de los directores

La conformidad del director/es de la tesis consta en el original en papel de esta Tesis Doctoral

AÑO 2022

*Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de
entrenamiento en el ejercicio de sentadilla*

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL DEPORTE

Departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal



**ANÁLISIS DE LA FATIGA MUSCULAR Y LA PERCEPCIÓN
DEL ESFUERZO EN DIFERENTES PROTOCOLOS DE
ENTRENAMIENTO EN EL EJERCICIO DE SENTADILLA**

Memoria que presenta **Francisco Torres López de Haro** para optar al grado de **Doctor**.

Cáceres (España), 2022

*Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de
entrenamiento en el ejercicio de sentadilla*



Dr. D. RAFAEL TIMÓN ANDRADA, profesor del Área de Educación Física y Deportiva del departamento de Didáctica de la Expresión Musical, Plástica y Corporal de la Universidad de Extremadura,

CERTIFICA:

Que la Tesis Doctoral realizada por D. **Francisco Torres López de Haro**, con el título: “Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla”, bajo mi codirección, reúne los requisitos necesarios de calidad, originalidad y presentación para optar al grado de Doctor, y está en condiciones de ser sometida a valoración de la Comisión encargada de juzgarla.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo la presente en Cáceres, a 31 de Enero de 2022.

Dr. D. RAFAEL TIMÓN ANDRADA

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

*Se puede caer y volverse a levantar y siempre
vale la pena volver a empezar, una y mil veces,
mientras uno esté vivo.*

- *José Mujica*

A mi madre y a mis abuelos, por haberme dado la mejor educación, y por transmitirme que todo en la vida se puede conseguir con trabajo y esfuerzo.

AGRADECIMIENTOS

Alcanzar un objetivo de vida tan marcado e importante para mí, como es la presentación de una Tesis Doctoral, y con ello, conseguir el título de Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, me hace sentir muy agradecido y especialmente, a todas aquellas personas que han pasado por mi vida a lo largo de todo este proceso, y que de algún modo, han contribuido para que todo ello, fuera posible.

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de Tesis, al Dr. Rafael Timón Andrada, por darme en su día, la posibilidad de trabajar con él en este proyecto, ya que sin su ayuda, paciencia y motivación, no podría haberlo realizado. Realizar una Tesis, es y será siempre un trabajo muy intenso y dedicado, y por eso, es de agradecer su buena predisposición, orientación y ánimo en los momentos más complicados a lo largo de estos años. Gracias por hacerme ver y transmitirme tu pasión por esta profesión, que también me ha hecho sentirme motivado y con ganas de seguir aprendiendo, tanto en el ámbito personal como profesional.

A mi madre, Antonia López de Haro Antúnez, por haberme apoyado siempre de forma incondicional, ante cualquier adversidad. Gracias por haberme inculcado siempre los valores de trabajo, esfuerzo, dedicación y sacrificio. A mi abuelo Ignacio López de Haro Gaspar, que descansa en paz, que siempre me enseñó a ser una buena persona, honesta y humilde. Seguro que desde ahí arriba, te sentirás orgulloso y te alegrarás siempre por verme feliz y cumplir los objetivos. Siempre serás una referencia para mí, la mejor persona que conocí jamás. A mi abuela, Antonia Antúnez Naharro, por estar siempre pensando y rezando para que todo me salga bien. Gracias por cuidarme siempre y transmitirme todo el cariño posible.

A todos los profesores y directores que me han ayudado a lo largo de toda mi formación académica, que gracias a ellos, me generaron ese interés de continuar mis estudios y por

supuesto el interés por el ejercicio físico y el rendimiento. A todo el equipo de experimentación de dicha Tesis, por haber participado desinteresadamente, y con la mayor actitud y predisposición.

A todos mis amigos y amigas Guada, Isra, Rubén, José, Susana, Óscar, María Jesús, María, Jorge, Cristina, Pilar, por la paciencia que han tenido siempre por verme tan ocupado y que no siempre he podido atender como se merece, al igual que a mi labrador Kurten por pasar infinidad de horas a mi lado a cambio de nada. Por último, también agradecer a todos los alumnos del centro de entrenamiento personal de todos estos años, que gracias a ellos, me ha hecho seguir trabajando con la ilusión del primer día.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Esta Tesis Doctoral se ha desarrollado dentro del Grupo de Avances en Entrenamiento y Acondicionamiento Físico (GAEDAF) de la Facultad de Ciencias del Deporte de la Universidad de Extremadura.



CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

Publicaciones derivadas de esta tesis doctoral.

Artículos científicos:

TORRES LÓPEZ DE HARO, F., OLCINA, G., TIMÓN, R. (2019). POSTPERFORMANCE FATIGUE IN CLUSTER-SET TRAINING WITH FREE AND GUIDED WEIGHT IN TRAINED ATHLETES. *MEDICINE DELLO SPORT*. 72(4):642-53.

TORRES LÓPEZ DE HARO, F., OLCINA, G., TIMÓN, R. (2021). FATIGUE AND PHYSICAL PERFORMANCE AFTER A SQUAT INERTIAL FLYWHEEL TRAINING. *MEDICINE DELLO SPORT*.

Comunicaciones orales y poster en Congresos Internacionales:

- Torres López de Haro, F., Timón, R. Análisis de la fatiga muscular en sentadillas tras un protocolo de entrenamiento de fuerza resistencia con y sin electroestimulación local. IX Simposio Internacional de Actualizaciones en el Entrenamiento de la Fuerza. Facultad de Ciencias del Deporte. Universidad Politécnica de Madrid, 2016.
- Torres López de Haro, F., Timón, R. Estudio de la fatiga muscular tras un protocolo de entrenamiento de fuerza en el ejercicio de sentadilla. Simposio EXERNET. Investigación en Ejercicio, Salud y Bienestar: Exercise is Medicine. Facultad de Enfermería. Universidad de Cádiz, 2016.
- Torres López de Haro, F., Timón, R. Pérdida de rendimiento físico tras un protocolo de entrenamiento de fuerza hipertrófica en sentadillas con y sin electroestimulación local. I International Conference on Technology in Physical Activity and Sport-Tapas. Universidad de Sevilla, 2020.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Otras contribuciones científicas.*Artículos científicos:*

- Berral de la Rosa, F., Torres-López de Haro, F., Berral-Aguilar, A., Berral-De la Rosa, C. (2016). Antropometría y cáncer. *Motricidad Humana*. 1: 32-35.
- Torres-López de Haro, F., Lara-Padilla, E., Sosa-Tallei, G., Berral, F. (2014). Análisis de composición corporal y somatotipo de judokas infantiles y cadetes en el campeonato de España 2012. *International Journal of Morphology*. 32 (1): 194-201.

Estancias de investigación.

Estancia de investigación en el Área de Educación Física y deportiva del Departamento de Deporte e informática de la Universidad Pablo de Olavide (Sevilla), desde el 1 de Julio de 2018 hasta el 31 de Julio de 2018, bajo la dirección del Dr. D. Francisco José Berral de la Rosa como responsable del Laboratorio de Biomecánica, Kinesiología y Cineantropometría.

ÍNDICE



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	41
1.1. LA FATIGA.....	41
1.1.1. Concepto de fatiga.....	41
1.1.2. Tipos de fatiga.....	43
1.1.3. Causas de la fatiga.....	49
1.1.4. Evaluación y control de la fatiga.....	55
1.1.5. La Fatiga y su relación con el rendimiento deportivo:	63
1.2. ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA MUSCULAR:	65
1.2.1. Definición de fuerza muscular.....	65
1.2.2. Manifestaciones de la fuerza:.....	67
1.2.3. Bases fisiológicas de la fuerza muscular.....	69
1.2.4. Adaptaciones producidas por el entrenamiento de la fuerza.....	72
1.2.5. Componentes de la carga.....	74
1.3. ENTRENAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE LA FUERZA.....	81
1.3.1. Entrenamiento con máquinas isoinerciales:.....	81
1.3.2. Entrenamiento con Electroestimulación (EMS).....	95
1.3.3. Entrenamiento Clúster.....	103
1.4. EVALUACIÓN Y CONTROL DE LA FUERZA MUSCULAR Y LA HIPERTROFIA. 115	
1.4.1. Evaluación de la fuerza muscular:	115
2. OBJETIVOS.....	125

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

2.1.	ESTUDIO 1:	125
2.2.	ESTUDIO 2:	126
3.	MATERIAL Y MÉTODOS.	131
3.1.	MATERIAL UTILIZADO.	131
3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.	131
3.2.1.	Estudio 1:	133
3.2.2.	Estudio 2:	139
3.3.	PARTICIPANTES.	142
3.3.1.	Estudio 1:	143
3.3.2.	Estudio 2:	144
3.4.	MEDICIONES EXPERIMENTALES:	144
3.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO:	148
4.	RESULTADOS.	151
4.1.	ESTUDIO 1:	151
4.2.	Estudio 2:	168
5.	DISCUSIÓN.	185
5.1.	ESTUDIO 1.	185
5.2.	ESTUDIO 2.	200
6.	CONCLUSIONES.	211
6.1.	ESTUDIO 1.	211
6.2.	ESTUDIO 2.	212
7.	APLICACIONES PRÁCTICAS.	217
8.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	221
9.	LIMITACIONES.	225

10.	BIBLIOGRAFÍA.	229
11.	ANEXOS.	269
11.1.	ANEXO 1: Consentimiento informado (Estudio 1).	269
11.2.	ANEXO 2: Consentimiento informado (Estudio 2).	271
11.3.	ANEXO 3: Documento de toma de datos sesión de familiarización.	273
11.4.	ANEXO 4: Comisión de Bioética y Bioseguridad de la Universidad de Extremadura. 275	

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

LISTADO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
1 RM	Una repetición máxima
ANOVA	Análisis de la varianza
ATP	Adenosín Trifosfato
CEA	Ciclo de Acortamiento y Estiramiento
CMJ	Countermovement Jump
DJ	Drop Jump
DOMS	Delayed Onset Muscle Soreness
EMG	Electromiografía
EMS	Electroestimulación
EPOC	Exceso de Consumo de Oxígeno Post Ejercicio
EVA	Escala Visual Analógica
FC	Frecuencia cardíaca
FT	Fast Twitch
GPS	Global Positioning System
IRR	Recuperación Inter-Repetición
ISR	Recuperación Intra-Serie
LJ	Long Jump
MCV	Máxima Contracción Voluntaria
p	Nivel de significación
ppm	Pulsaciones por minuto
RPE	Rating of Perceived Exertion
SJ	Squat Jump
SNC	Sistema Nervioso Central
SNP	Sistema Nervioso Periférico
ST	Slow Twitch
TMG	Tensiomiografía
VO2 MÁX	Consumo Máximo de Oxígeno

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Orden y temporalización de los entrenamientos a los 16 sujetos.	133
Tabla 2.	Protocolo de la metodología de entrenamiento Clúster.	138
Tabla 3.	Orden y temporalización de los entrenamientos de los 16 sujetos.	139
Tabla 4.	Datos descriptivos de la muestra N = 16 sujetos (Estudio 1).....	143
Tabla 5.	Datos descriptivos de la muestra N = 16 sujetos (Estudio 2).....	144
Tabla 6.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría (Estudio1).	151
Tabla 7.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de RPE y FC (Estudio 1).152	
Tabla 8.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.	152
Tabla 9.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower) de las variables de RPE y FC.	153
Tabla 10.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack + Compex) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.	154
Tabla 11.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack + Compex) de las variables de RPE y FC.	154
Tabla 12.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower + Compex) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.....	155
Tabla 13.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower + Compex) de las variables de RPE y FC.....	155
Tabla 14.	Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría (Estudio 2).	168

Tabla 15. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de RPE y FC (Estudio 2).169

Tabla 16. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (YOYO) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría. 169

Tabla 17. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (YOYO) de las variables de RPE y FC. 170

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Realización de los diferentes entrenamientos de fuerza.</i>	132
Figura 2.	<i>Báscula Tanita®, SC 240-MA, Japan.</i>	134
Figura 3.	<i>Electroestimulador Compex® Performance, Switzerland</i>	135
Figura 4.	<i>Elíptica Technogym TM®, Synchro, Italy.</i>	136
Figura 5.	<i>Technogym TM®, Máquina Smith Selection pro-Multipower, Italy.</i>	137
Figura 6.	<i>Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain.</i>	141
Figura 7.	<i>Exxcentric®, Yoyo Squat Kbox 4 Pro System, Sweden.</i>	142
Figura 8.	<i>Algómetro digital (FPI®, Wagner Force One Fdix, EEUU).</i>	145
Figura 9.	<i>Plataforma de contacto (Chronojump®, DIN A2, Spain).</i>	146
Figura 10.	<i>Dinamómetro Holtain®, Back D, (UK).</i>	146
Figura 11.	<i>Pulsómetro (Polar®, RS800cx, Finland.</i>	147
Figura 12.	<i>Escala de esfuerzo percibido OMNI-RES. Adaptado de Robertson et al. (2003).</i> ..	148
Figura 13.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Tiempo de vuelo en SJ.</i>	156
Figura 14.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Altura en SJ.</i>	157
Figura 15.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Potencia en SJ.</i>	158
Figura 16.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Velocidad en SJ.</i>	159
Figura 17.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Tiempo de vuelo en CMJ.</i>	160
Figura 18.	<i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Altura en CMJ.</i>	161

Figura 19. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Potencia en CMJ.....</i>	162
Figura 20. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Velocidad en CMJ.....</i>	163
Figura 21. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Algómetro.</i>	164
Figura 22. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Dinamometría.</i>	165
Figura 23. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex, Multipower + Compex) en valores finales de RPE.</i>	166
Figura 24. <i>Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de FC.</i>	167
Figura 25. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Tiempo de vuelo en SJ..</i>	170
Figura 26. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Altura en SJ.</i>	171
Figura 27. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Potencia en SJ.</i>	172
Figura 28. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Velocidad en SJ.</i>	173
Figura 29. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Tiempo de vuelo en CMJ.</i>	174
Figura 30. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Altura en CMJ</i>	175
Figura 31. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Potencia en CMJ.....</i>	176
Figura 32. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Velocidad en CMJ.....</i>	177
Figura 33. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Algómetro.....</i>	178
Figura 34. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Dinamometría.</i>	179
Figura 35. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de RPE.</i>	180
Figura 36. <i>Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Frecuencia cardíaca. ...</i>	181

RESUMEN



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

RESUMEN

Introducción. La fatiga muscular está considerada como una variable fundamental en el entrenamiento con cargas. De ella depende que los deportistas alcancen o no un rendimiento deportivo, o aumenten el volumen de entrenamiento, sin la pérdida de eficacia. En los últimos años han ido apareciendo numerosos medios de entrenamiento (máquinas isoinerciales, entrenamiento con electroestimulación, etc.) que han favorecido la optimización del rendimiento deportivo. Las adaptaciones fisiológicas y musculares podrían variar dependiendo del medio de entrenamiento empleado, y por ello es importante conocer y analizar la fatiga que ocasionan cada uno de ellos. **Objetivo.** El objetivo global de la presente tesis doctoral fue analizar la fatiga aguda muscular y la pérdida de rendimiento en el tren inferior tras la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza hipertrofia, comparando y combinando diferentes medios, tanto tradicionales como más actuales. **Método.** Estudio 1: 16 sujetos entrenados participaron voluntariamente en el estudio. El objetivo fue analizar la fatiga muscular localizada y la pérdida de rendimiento en el tren inferior, tras la realización de diferentes protocolos de entrenamiento hipertrófico con metodología Clúster en el ejercicio de sentadilla, utilizando para ello peso guiado (Multipower) y peso libre (Rack), con y sin electroestimulación (EMS). El entrenamiento consistió en 4 sesiones de entrenamientos de fuerza (70% 1RM) con diferentes medios (peso libre, peso guiado, peso libre + EMS y peso guiado + EMS), separados por una semana de intervalo entre cada una de ellas, y aplicándose 3 bloques de 5 series de 3 repeticiones por serie y 6 segundos de descanso entre series, y de 1 minuto entre cada bloque. El programa EMS de Compex, consistió en un programa de fuerza resistencia con una frecuencia de 60 Hz en la fase contracción y 7 Hz en la fase de reposo, siempre a la máxima intensidad soportada por el sujeto. Se analizó la variabilidad en la capacidad de salto (SJ, CMJ), la fuerza máxima isométrica, el dolor muscular localizado, la frecuencia cardíaca (FC) y la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE). Estudio 2: 16 sujetos entrenados participaron voluntariamente en el estudio. El objetivo de este estudio fue analizar la fatiga muscular localizada y pérdida de rendimiento en el tren inferior, tras la realización de dos protocolos de entrenamiento de fuerza hipertrofia en el ejercicio de sentadilla, utilizando por un lado el entrenamiento tradicional de peso libre (Rack), y por otro lado, el entrenamiento isoinercial con una plataforma Yoyo. El entrenamiento consistió

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

en 2 sesiones de entrenamientos de fuerza, siendo éstos, peso libre e isoinercial, separados por una semana de intervalo entre cada una de ellas, aplicándose 3 series de 15 repeticiones por serie y 1 minuto entre cada serie. Al igual que en el primer estudio, se analizó la variabilidad en la capacidad de salto (SJ, CMJ), la fuerza máxima isométrica, el dolor muscular localizado, la frecuencia cardíaca (FC) y la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE). **Resultados:** Estudio 1: A nivel intragrupo, en todos los protocolos de entrenamiento realizados (peso libre, peso guiado, peso libre + EMS y peso guiado + EMS), se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) en todas las variables analizadas, a excepción de la variable de dolor muscular localizado (Algómetro), la cual no difirió entre los valores iniciales y finales en ningún protocolo. Asimismo, a nivel intergrupos, no se encontraron diferencias significativas en ninguna de las variables analizadas entre los diferentes medios. Estudio 2: A nivel intragrupo, se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre el inicio y el final, en todas las variables analizadas en ambos protocolos de entrenamientos (peso libre y yoyo). Además, a nivel intergrupos, se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre ambos medios de entrenamiento, únicamente en las variables de los saltos verticales (SJ y CMJ). **Conclusiones:** Los hallazgos obtenidos en esta tesis doctoral, nos indican que el entrenamiento de fuerza hipertrofia, genera una fatiga aguda muscular localizada y con ello, un descenso en el rendimiento deportivo. Además, los diferentes medios de entrenamiento analizados, nos muestran los efectos agudos en cada uno de sus protocolos, lo que nos hace ver, que el entrenamiento isoinercial con sobrecarga excéntrica, resultó ser el más fatigante de todos. Por tanto, estos resultados proporcionan una gran información con el objetivo de que los entrenadores y preparadores físicos, tengan un conocimiento específico para programar las variables del entrenamiento y con ello, aumentar el rendimiento de los deportistas.

ABSTRACT



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

ABSTRACT

Introduction. Muscle fatigue is considered a fundamental variable in strength training. It depends on it whether or not athletes achieve sports performance, or increase the volume of training, without losing efficiency. In recent years, numerous training methods have been appearing (isoinertial devices, electrostimulation training with electrostimulation, etc.) that have favored the optimization of sports performance. The physiological and muscular adaptations could vary depending on the training protocol used, and therefore it is important to know and analyze the fatigue caused by each of them. **Objective.** The overall aim of this doctoral dissertation was to analyze acute muscle fatigue and loss of performance in the lower body after performing a hypertrophy strength training protocol, comparing and combining different protocols, both traditional and more current. **Method.** Study 1: 16 trained subjects voluntarily participated in the study. The objective was to analyze localized muscle fatigue and loss of performance in the lower body, after performing different hypertrophic training protocols with Cluster methodology in the squat exercise, using guided weight (Multipower) and free weight (Rack), with and without electrostimulation (EMS). The training consisted of 4 strength training sessions (70% 1RM) with different protocols (free weight, guided weight, free weight + EMS and guided weight + EMS), separated by a week interval between each one of them, and applying 3 blocks of 5 series of 3 repetitions per series and 6 seconds of rest between series, and 1 minute between each block. The Compex EMS program consisted of a resistance strength program with a frequency of 60 Hz in the work phase and 7 Hz in the rest phase, always at the maximum intensity supported by the subject. Variability in jumping ability (SJ, CMJ), maximum isometric strength, localized muscle pain, heart rate (HR) and rated perceived exertion (RPE) were analyzed. Study 2: 16 trained subjects voluntarily participated in the study. The aim of this study was to analyze localized muscle fatigue and loss of performance in the lower body, after performing two hypertrophy strength training protocols in the squat exercise, using, on the one hand, traditional free weight training (Rack), and on the other hand, isoinertial training (Yoyo squat). The training consisted of 2 sessions of strength training, these being free weight and isoinertial training, separated by a one-week interval between each of them, applying 3 set of 15 repetitions per set and 1 minute of rest between each set. As in the first study, variability in

jumping ability (SJ, CMJ), maximum isometric strength, localized muscle pain, heart rate (HR) and rated perceived exertion (RPE) were analyzed. **Results:** Study 1: At the intragroup analysis, in all the training protocols performed (free weight, guided weight, free weight + EMS and guided weight + EMS), significant differences ($p < 0.05$) were obtained in all the variables analyzed, at except for the localized muscle pain (Algometer), which did not differ between the initial and final values in any protocol. Likewise, at the intergroup analysis, no significant differences were found in any of the variables analyzed between protocols. Study 2: At the intragroup analysis, significant differences ($p < 0.05$) were obtained between the beginning and the end, in all the variables analyzed in both training protocols (free weight and yoyo squat). In addition, at the intergroup analysis, significant differences ($p < 0.05$) were obtained between both training protocols, only in the vertical jump (SJ and CMJ). **Conclusions:** The findings obtained in this doctoral dissertation indicate that hypertrophy strength training generates acute localized muscle fatigue and with it, a decrease in sports performance. In addition, the different training analyzed show us the acute effects in each of their protocols, which makes us see that isoinertial training with eccentric overload turned out to be the most fatiguing of all. Therefore, these results provide great information in order for coaches and physical trainers to have specific knowledge to program the training variable and thereby increase performance of athlete performance.

INTRODUCCIÓN



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA FATIGA.

La fatiga hace referencia a un fenómeno global y multifactorial cuya etiología no ha sido totalmente entendida, a pesar de haber sido objeto de estudio de muchas investigaciones científicas durante más de 100 años (Enoka & Duchateau, 2008).

Es importante concebirla como un mecanismo de defensa, el cual se activa ante el deterioro de determinadas funciones orgánicas, para evitar la realización de esfuerzos por encima de sus límites, con el objetivo de prevenir deterioros orgánicos irreversibles (Wilmore & Costill, 2007).

Podemos encontrar la primera referencia científica en relación a la fatiga muscular a comienzos del siglo XX, cuando Fletcher (1904), publicaba un artículo en relación a las propiedades osmóticas del músculo, así como a las alteraciones durante el proceso de fatiga. Posteriormente, ha habido una gran evolución en los estudios científicos relacionados con esta temática, cuyos objetivos eran por un lado medir la fatiga y por otro, los procesos de recuperación a través de los indicadores fisiológicos.

Peters (1913), investigó la producción de ácido láctico en anfibios, y pocos años después, se publicó un artículo, que relacionaba como indicadores de la fatiga muscular, a la acumulación de lactato, la depleción de glucógeno y la acidosis muscular (Marx, 1993). Seguidamente, fueron apareciendo diferentes estudios que la relacionaban con impulsos eléctricos (Barnes & Mauer, 1946), con la adrenalina (Overbeek, 1949) o incluso con la unión neuromuscular (Brown & Burns, 1949).

1.1.1. Concepto de fatiga.

El conocimiento sobre el concepto de fatiga ha ido evolucionando a lo largo de los años,

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

partiendo desde Edwards (1981), que la define como la incapacidad del músculo esquelético para mantener una determinada potencia máxima en un tiempo de ejercicio y por tanto reduciéndose la tensión muscular máxima. Seguidamente, Enoka & Stuart (1992) la definen como una disminución involuntaria de la fuerza tras la realización de un entrenamiento, pasando por Allen (1995), el cual incluía aspectos como el de la velocidad de acortamiento muscular. En la actualidad, el descenso de velocidad en el entrenamiento con cargas es un indicador muy válido para estimar la fatiga (González-Badillo et al., 2017), así como a través de la pérdida transitoria y progresiva en la capacidad para generar fuerza (Sánchez-Medina et al., 2017).

Por otro lado, López-Chicharro y Fernández (2006) la caracterizan también por un descenso en la capacidad de rendimiento, así como la incapacidad del músculo para desarrollar fuerza máxima. Por tanto, la fatiga muscular se define como la disminución de la capacidad de generar o mantener unos niveles de fuerza o potencia de los músculos implicados durante el ejercicio físico (Minett & Duffield, 2014) y considerándose como un indicador para evitar la aparición de lesiones o incluso la muerte (Abbiss & Laursen, 2005).

A continuación, pasamos a definir el concepto de fatiga en el contexto del ejercicio físico, donde una de las definiciones más utilizadas de este término, hacen referencia a una acumulación del estrés producido por el entrenamiento, disminuyendo el rendimiento, con o sin señales psicológicas y fisiológicas relacionadas.

Además, se restaura la capacidad de actuación en un plazo de varias semanas, diferenciándose del estado de sobreentrenamiento, en que la disminución del rendimiento es de larga duración y la capacidad de actuación no se recupera hasta pasadas varias semanas e incluso meses (Halsen & Jeukendrup, 2004).

Por tanto, podríamos hablar de una disminución en la capacidad de rendimiento como consecuencia de las cargas de entrenamiento y se conoce como fatiga física o muscular (Legido, 1986). Además, la fatiga resulta imprescindible para alcanzar respuestas de adaptación y de supercompensación, siempre y cuando estas cargas no lleven a estados de sobreentrenamiento.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Es por ello, por lo que la fatiga es un indicador del umbral máximo, que debe alcanzar la carga de trabajo para garantizar la mejora de rendimiento, así como la eficacia del proceso de entrenamiento (García-Manso, 1999). Este mismo autor, además indica que la fatiga se produce cuando:

- No se permite una recuperación al organismo tras la realización de un trabajo intenso y prolongado (sobreentrenamiento).
- Existe una disminución del metabolismo de los hidratos de carbono y de las proteínas, no existiendo por tanto una asimilación adecuada de los mismos.
- Se produce una disminución en la proporción de iones (sodio, potasio,...) y agua en el organismo.
- Se produce una disminución del nivel de oxígeno celular, con el consiguiente descenso en la proporción de oxígeno en el músculo.
- Existe una hipoglucemia (bajo nivel de glucosa en sangre), el cual favorece más la aparición de fatiga psíquica.
- Existe una falta de reposición en las sales minerales perdidas por el ejercicio físico.
- Se lleva a cabo un estilo de vida alterado o poco ordenado (trasnochar, sin dejar al cuerpo descansar adecuadamente).

1.1.2. Tipos de fatiga.

Conocer en qué nivel se origina la fatiga durante la realización de actividad física, resulta bastante complejo, debido a la gran variedad de variables que afectan a la misma. Debemos entender que la fatiga no siempre aparece localizada en un sólo punto concreto, sino que puede estar asociada a fallos a diferentes niveles del mecanismo de contracción muscular.

A continuación, pasamos a definir los tipos de fatiga que conocemos por la bibliografía científica, teniendo en cuenta el punto donde se origina propuesta por Guillén-del Castillo y Linares (2002) que son:

1.1.2.1. Fatiga central:

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Tipo de fatiga que incluye hechos que se producen en el cerebro y espina dorsal, producida por unas alteraciones en el funcionamiento cerebral que afecta a la conducción de los impulsos o en la propia sinapsis, involucrando la producción y la acción del neurotransmisor y por tanto un fallo en el Sistema Nervioso Central (SNC) (López-Chincharro et al., 2006). Por tanto, el origen en la fatiga central, se produce en las estructuras nerviosas que intervienen en la actividad muscular. Además, la fatiga central, no sólo puede referirse a un déficit motor, sino también a una disminución en la función mental, la cual se puede describir como la disminución gradual en la capacidad de fuerza de los músculos o del punto final de una actividad sostenida, pudiendo medirse a través de una modificación en la actividad electromiográfica, por un descenso en la fuerza muscular, así como por un agotamiento de la función contráctil (Enoka & Duchateau, 2008). Para poder evaluar la existencia de fatiga central de forma cualitativa y cuantitativa, se utilizan medios como la electromiografía, electroestimulación muscular, etc.

1.1.2.2. Fatiga neuromuscular:

Se da en las estructuras intervinientes en la acción muscular (Unidad motora), en las que se produce una alteración en la tensión de las fibras musculares. Esto provoca que no se pueda mantener la fuerza, y puede ser debido a varias causas, como por ejemplo la incorrecta transmisión del impulso nervioso al llegar al sarcolema muscular, o la activación de suministro energético a través de la liberación de calcio entre otras, implicando por tanto la reducción de la producción de fuerza por parte del músculo. En definitiva, un fallo electromecánico del músculo con una activación contráctil insuficiente en situaciones normales, o una disminución del aporte de ATP necesario para la contracción, o incluso la pérdida de la maquinaria contráctil entre otras.

1.1.2.3. Fatiga Metabólica:

A nivel metabólico, cabe mencionar que una de las características principales del músculo es que puede consumir Adenosín Trifosfato (ATP) a una velocidad superior a la que

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

éste puede ser regenerado. En la realización de un ejercicio de alta intensidad, la concentración de ATP se mantiene prácticamente constante, sin embargo, se produce un aumento en las concentraciones de Adenosín Difosfato (ADP), fosfato inorgánico (Pi), creatina (Cr) y protones (H⁺), así como un descenso en las concentraciones de fosfocreatina (PCr) y glucógeno muscular (Allen, et al., 2008; Allen & Trajanovska, 2012; Fitts, 2008; Gorostiaga et al., 2010). Sin embargo, el nivel de acidosis observado en la realización de ejercicios de alta intensidad, es más variable debido a que la velocidad y el grado de activación de la glucólisis anaeróbica, dependen del tipo de fibra y de la actividad realizada. En adición a esto, las fibras musculares contienen además una gran cantidad de transportadores de lactato, que hace reducir cualquier acumulación intracelular de lactato y protones (Allen & Trajanovska, 2012). Durante mucho tiempo, el descenso del pH intracelular asociado con la acumulación de ácido láctico y la disminución de la concentración de potasio se ha considerado como el mayor causante de la fatiga muscular (Allen & Trajanovska, 2012; Cairns & Lindinger, 2008).

Para comprender mejor las causas por las que se produce la fatiga global en el organismo, comenzaremos describiendo por qué se producen esas alteraciones o modificaciones a nivel interno y con ello profundizar más en esta temática. Éstas son:

- Adenosín Trifosfato (ATP): Resulta imprescindible un aporte suficiente para producir una contracción muscular en el organismo. Sin embargo, el ATP libre del sarcoplasma es muy limitado permitiendo únicamente contracciones de máxima intensidad de menos de cinco segundos, por lo que es muy importante y necesaria la aceleración de los procesos metabólicos para restituir el ATP consumido. Por tanto, la aparición de la fatiga, se produce como consecuencia de este estado de desequilibrio en la reutilización de ATP, pudiendo ser una de las causas a nivel global de la fatiga en el organismo (López & Dorado, 2006).

- Fosfocreatina (PC): Su concentración es incluso hasta cuatro veces superior que la del ATP, que disminuyen al intentar restaurar los niveles de ATP, provocando un descenso a nivel muscular. Los valores mínimos observados en un estado de fatiga intensa son de un 70% de ATP y de un 10% para la PC en reposo, siendo la magnitud de la pérdida proporcional a la intensidad

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

del ejercicio realizado (Roberts & Smith, 1989).

○ Glucógeno: Hace referencia a uno de los sustratos energéticos utilizados por el deportista durante un entrenamiento o competición (Bangsbo et al., 2006) y su depleción está considerada como una de las causas principales de la fatiga muscular (Nedelec et al., 2012). La evidencia científica ha demostrado que las concentraciones de glucógeno que dispone un músculo, son uno de los principales determinantes de la resistencia a la fatiga muscular, tanto en fibras de contracción rápida (FT) como de contracción lenta (ST). El excesivo almacenamiento de glucógeno eleva los niveles de reserva del músculo y se asocia con un aumento de resistencia en ejercicios de larga duración. Además, si durante la actividad física se realiza una ingesta de hidratos de carbono, se retrasa la depleción de glucógeno muscular y por tanto la aparición de fatiga. Estas reservas se agotan después de unos cien minutos de intensidad moderada (Hultman & Sjöholm, 1983).

Por otro lado, al agotarse las concentraciones de glucógeno, el flujo de hidratos de carbono hacia el ciclo de Krebs pasa a depender exclusivamente de la captación muscular de glucosa plasmática, es decir, del balance entre su producción hepática y su captación muscular. Por ello, el glucógeno de un músculo resultará determinante para la capacidad de resistencia a la fatiga muscular de ese músculo (Coyle, 1991).

Autores como Krustup et al., (2006), observaron en su estudio como al final de un entrenamiento, las fibras musculares mostraban unos valores muy bajos de glucógeno, llegando incluso a una disminución de hasta un 75% (Bangsbo, 2000). Esta reducción de glucógeno muscular, estimulará la síntesis de glucógeno durante la recuperación, de manera que la ingesta de alimentos ricos en carbohidratos tras la finalización del ejercicio, llevará por un lado a incrementar el ratio de síntesis de glucógeno y por otro, a incrementar el nivel de glucógeno incluso por encima de los niveles pre-ejercicio (Hauswirth & Mujika, 2013).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Ácidos Grasos: La mayor parte del ATP, es obtenido a través de la oxidación de los ácidos grasos, asegurándose así el suministro de glucosa a los tejidos. Durante la realización de ejercicio aeróbico de baja intensidad, la obtención de energía se produce a partir de los ácidos grasos y con ello retrasando el consumo hepático y muscular. Por tanto la contribución de los lípidos al metabolismo oxidativo, depende fundamentalmente de la intensidad y de la duración de la carga, siempre y cuando la intensidad no supere el 60-70% del VO₂máx. La evidencia científica, nos indica que la utilización de los ácidos grasos en el metabolismo oxidativo, es fundamental para prevenir la aparición de la fatiga.

- Proteínas: El organismo no utiliza cantidades importantes de proteínas durante la primera hora de ejercicio. Pero si se aumenta el tiempo de entrenamiento, se aumenta el uso de proteínas hasta un 18% (García-Manso, 1999), generándose un incremento de aminoácidos libres.

- Oxígeno: Un aumento de oxígeno al músculo, retrasa principalmente la acumulación de ácido láctico en el músculo (Wasserman, 1984).

1.1.2.4. Otra clasificación de la fatiga:

Los autores López-Calbet y Dorado-García (2006) realizaron una división de la fatiga en función de la frecuencia de estimulación, basada en dos tipos, que son:

- Fatiga de alta frecuencia: Tipo de fatiga relacionada con la pérdida selectiva de fuerza a altas frecuencias de estimulación (Tetanización).
- Fatiga de baja frecuencia: Tipo de fatiga relacionada con la pérdida selectiva de fuerza a bajas frecuencias de estimulación.

Por todo ello, durante la realización del ejercicio físico comenzarán a darse dificultades para mantener la fuerza inicial por la aparición de la fatiga neuromuscular (Rampinini et al., 2011) y de la fatiga central (Gandevia, 2001). Sin embargo, no nos debemos limitar únicamente a la tradicional distinción entre la fatiga central o neuromuscular, ya que es muy difícil establecer

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

una relación a cada una de ellas, puesto que también existe una fatiga sensorial, psíquica o mental, que aunque no se relaciona con el aparato neuromuscular, en la práctica encontramos una clara interdependencia con el síndrome general de fatiga (Bougard, 1989).

Respecto al momento de aparición, Guillén-del Castillo y Linares (2002), clasifican los tipos de fatiga que nos podemos encontrar. Estos son:

- Fatiga aguda: Hace referencia a la incapacidad de mantener un nivel de fuerza o intensidad de ejercicio determinada (Gómez-Campos et al., 2010). Asimismo, autores como Enoka y Stuart (1992), indican que la fatiga aguda, está relacionada a una incapacidad del músculo para aumentar los niveles de potencia y fuerza, así como de mantener un nivel de intensidad determinada en el tiempo, por lo que provocará una disminución en el rendimiento, pudiendo incluso prolongarse desde minutos a horas. Además, se entiende que ciertos niveles de fatiga aguda son favorables para producir el déficit de supercompensación (Aubry et al., 2014; Stanley et al., 2013).

- Fatiga subaguda: También conocida como sobrecarga y se manifiesta al aplicarse cargas de trabajo sin haber completado una recuperación completa entre series y repeticiones. Puede aparecer tras diferentes semanas de entrenamiento con insuficientes periodos de regeneración y recuperación.

- Fatiga crónica: Hace referencia a un descenso en el rendimiento que se prolonga en el tiempo, el cual se produce por un desequilibrio entre el estrés producido por el entrenamiento y la recuperación. De igual modo, este tipo de fatiga muscular, permanece por más tiempo en el cuerpo, debido a la imposibilidad de una correcta recuperación por parte de los tejidos de forma completa. Es por ello, por lo que se necesitan mayores periodos de recuperación para no provocar un sobreentrenamiento, así como lesiones musculo esqueléticas e incluso en órganos. La fatiga crónica se divide en tres estados claramente diferenciados como son el overreaching funcional, overreaching no funcional y sobreentrenamiento (Aubry et al., 2014; Meeusen et al., 2013).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En primer lugar, el overreaching funcional se traduce en un descenso en el rendimiento durante unos días o semanas, para que seguidamente, tienda a supercompensarse aumentando sus valores iniciales. En segundo lugar, el overreaching no funcional, que genera un descenso en el rendimiento hasta incluso un mes para después volver a los niveles iniciales (Aubry et al., 2014; Meeusen et al., 2013). Finalmente, está el estado de sobreentrenamiento que es el más severo de todos los tipos de fatiga crónica, el cual genera una disminución en el rendimiento de manera prolongada, con más de 1 mes sin volverá los niveles iniciales (Petibois et al., 2003).

1.1.3. Causas de la fatiga.

El estudio de la fatiga muscular se fundamenta en analizar las causas que provocan un descenso en la capacidad de trabajo muscular, experimentando un descenso agudo en el rendimiento como consecuencia del entrenamiento con cargas.

Desde el punto de vista de la fisiología, autores como Taylor et al. (2006), afirman que la fatiga muscular, engloba a las propiedades contráctiles del músculo, así como a los más altos niveles fisiológicos y neurofisiológicos. Por tanto, a nivel neuromuscular, podemos encontrar fatiga en la corteza motora, en las vías excitatorias, en las estructuras de control de las motoneuronas superiores e inferiores, en el suministro metabólico de energía en el sarcolema, en la placa motora y en el acoplamiento excitación-contracción (Thorsen et al., 2001).

Asimismo, un deportista, finaliza la realización de ejercicio físico no cuando está fatigado sino exhausto, por lo que la fatiga no únicamente se da cuando el organismo falla, sino desde el inicio de la actividad física de manera progresiva y gradual antes de que el músculo alcance el fallo muscular. El descenso de la velocidad de ejecución entre diferentes series de entrenamiento o incluso entre repeticiones, está siendo un indicador de fatiga muy importante en numerosos estudios (Pareja-Blanco et al., 2014).

Además de todos estos aspectos, para algunos autores, la edad de los sujetos también resulta como un factor imprescindible para la predisposición de la fatiga (Baudry et al., 2007), de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

manera que las personas de más edad mostraban una mayor fatiga que las personas con menos edad. Otros autores como Hunter et al. (2005), demostraron que ocurría todo lo contrario en la realización de ejercicios isométricos. Respecto a la comparativa entre hombres y mujeres, no se han encontrado diferencias significativas en el mantenimiento de la contracción y descenso de la fuerza (Clark et al., 2005), aunque las mujeres resultan ser más resistentes que los hombres en contracciones de baja intensidad Hunter et al. (2006).

A continuación pasamos a describir las causas que afectan a los diferentes tipos de fatiga.

1.1.3.1. Causas por las que se genera fatiga central:

Son multitud de causas, por las que se generan alteraciones tanto a nivel cerebral como en la espina dorsal, las cuales están producidas por determinadas alteraciones en el funcionamiento cerebral y que pueden afectar a las conducciones de los impulsos nerviosos o incluso en la propia sinapsis, generando por tanto un fallo en el Sistema Nervioso Central (SNC). Entre las causas que pueden generar fatiga central, destacamos las siguientes:

1.1.3.1.1 Neurológicas: En situaciones donde se produzca un descenso de los niveles de hidratos de carbono (Hipoglucemia), debido a un excesivo consumo de la glucosa por parte de los músculos, la neurona reduce o para su actividad y con ello una limitación del movimiento (Barbany, 2006).

1.1.3.1.2 Cardiovasculares: La actividad del corazón resulta incapaz de controlar y abastecer adecuadamente las necesidades de los incrementos del flujo sanguíneo y con ello no poder mantener su actividad (Barbany, 2006).

1.1.3.1.3 Endocrinas: Las modificaciones de concentración plasmática o la actividad de determinadas hormonas (corticosuprarrenales, tiroidea, hormona del crecimiento o catecolaminas), pueden ser responsables en la aparición de fatiga durante el ejercicio de larga duración (Barbany, 2006).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

1.1.3.1.4 Termorreguladoras: Al encontrarse en situaciones donde la temperatura resulta hostil, se produce un mayor volumen cardíaco por minuto para mantener el esfuerzo con respecto a situaciones normales de temperatura en rangos de homeostasis. Ante esto, se produce un aumento del trabajo respiratorio con la sensación de falta de oxígeno, provocando por tanto fatiga. A pesar de que actualmente no existen muchos estudios científicos que relacionen la temperatura central con el ejercicio, parece ser que la tendencia de diversas investigaciones hace que esta relación sea positiva. El autor Kistemaker et al. (2006), refleja que la temperatura central puede aumentar o descender sus valores tras el ejercicio en función del lugar de toma de temperatura. Cabe destacar que las personas con adherencia al ejercicio físico, tienen una mayor capacidad termorreguladora que las personas sedentarias, puesto que se comprueba una rápida sudoración durante el ejercicio submáximo de las personas entrenadas respecto a los no entrenados (Smorawinski et al., 2005).

Además, un aumento excesivo de la temperatura central, también puede generar un descenso en el rendimiento de los deportistas, tanto en competiciones o entrenamientos en climas calurosos, (Buchheit et al., 2012). Los deportistas que compiten en condiciones calurosas superiores a 30° (Buchheit et al., 2011), además de mostrar mayores niveles de fatiga, recorren una menor distancia que aquellos que compiten con temperaturas menos calurosas (Mohr et al., 2010). Se ha demostrado además, que ante un aumento de la temperatura central, se puede llegar a una alteración de impulsos neuronales (Thomas et al., 2006), lo que en consecuencia, puede derivar en un descenso en el rendimiento del deportista tanto mental como físico (Morrison et al., 2004).

1.1.3.1.5 Amoniogénesis: Su aumento en los ejercicios de larga duración y alta intensidad, puede ser la causa principal de fatiga, sobre todo en fibras FT, ya que la capacidad de amoniogénesis es superior en este tipo de fibras que en las fibras ST (Barbany, 2006). Es por ello, por lo que tras la realización de un trabajo muscular intenso, pueden aparecer importantes cantidades de amonio (NH₃), provocando que la fibra muscular se encuentra muy inestable en precarias condiciones de energía. Este NH₃ ionizado como NH₄⁺, si se acumula en niveles excesivos, crea dificultades funcionales en la fibra, modificando su permeabilidad (Barbany, 2006).

1.1.3.1.6 Deshidratación: Hace referencia a un proceso que se origina durante la práctica deportiva debido a la pérdida de fluidos a través de la sudoración, que hace que los deportistas disminuyan el rendimiento de sus propias capacidades físicas, e incrementando además su frecuencia cardíaca, así como la temperatura central (Nielsen, 1984). Es durante la fase de recuperación, cuando los deportistas van a demandar una recomposición de fluidos perdidos para poder mantener un equilibrio hidroeléctrico adecuado. Si la pérdida de fluidos se encuentra por debajo de 0.5% del peso corporal, no se dan efectos negativos en el organismo, mientras que si se supera esa cifra, el rendimiento se ve afectado de manera negativa en la regulación de la temperatura corporal, función cardiovascular o metabolismo muscular (Horswill, 1988).

Numerosos autores afirman que al finalizar un proceso de entrenamiento en condiciones térmicas neutras, se llega a perder en torno al 2% de la masa corporal debido a la pérdida de líquidos (Nedelec et al., 2012), o en otros términos, más de 3 litros de fluidos (Mohr et al., 2005), y llevando por tanto un descenso en el rendimiento del deportista. Esta pérdida de masa corporal por fluidos de un 1-2%, contribuye al aumento de la temperatura central, al estrés cardiovascular y a un posible descenso de rendimiento (Ralo-Monteiro et al., 2003), mientras que más de un 5% puede llevar a un descenso del rendimiento de hasta un 30% (Horswill, 1988).

1.1.3.2. Causas por las que se genera fatiga neuromuscular:

La fatiga neuromuscular al igual que la fatiga central, puede generarse por varios procesos que se producen a nivel fisiológico. A continuación, vamos a explicar los motivos por los cuales se produce este tipo de fatiga:

1.1.3.2.1 Suministro inadecuado de oxígeno a los músculos involucrados: Hace referencia a situaciones concretas donde se producen contracciones isométricas o concéntricas intensas o máximas, siendo muy difícil de vencer esa resistencia y produciendo por tanto unas dificultades para la irrigación sanguínea, así como el suministro energético y de oxígeno a los músculos concretos y no pudiendo atender a sus necesidades (Barbany, 2006).

1.1.3.2.2 Agotamiento de reservas energéticas: Para la reconstrucción de ATP, se utiliza la fosfocreatina en condiciones de anaeróbicas, siendo ésta, hasta cuatro veces mayor que el ATP

(López-Calbet & Dorado-García, 2006). Estas reservas de ATP y fosfocreatina garantizan únicamente contracciones que no superen los cinco u ocho (López-Calbet & Dorado-García, 2006) desde el inicio de la contracción, mientras las reservas de glucógeno permiten continuar la contracción entre 10 y 20 minutos (Barbany, 2006). Durante la ejecución de contracciones máximas repetidas, la fatiga coincide con el agotamiento de la fosfocreatina a pesar de que el ATP es el responsable directo de la energía utilizada, pero dicho ATP se agota más lentamente ya que está siendo producido por otros sistemas. Así, cuando se agota la fosfocreatina, la capacidad corporal para reponer el ATP gastado con la rapidez necesaria queda dificultada, por lo que disminuyen los niveles de ATP y cuando llega el agotamiento el ATP y la fosfocreatina pueden estar agotados (Wilmore & Costill, 2004). Por otro lado, durante la descomposición del glucógeno muscular, los niveles musculares de ATP también son mantenidos, ya que en pruebas de muy corta duración, el glucógeno muscular actúa como fuente principal de energía para la síntesis de ATP (Wilmore & Costill, 2004).

1.1.3.2.3 Disminución del pH intracelular: Debemos hacer mención al ácido láctico, el cual es un producto de desecho que se acumula en el interior de las fibras musculares, tras la realización de ejercicios muy intensos y de corta duración. Si el ácido láctico no se elimina, se convierte en lactato, produciendo una acumulación de iones de hidrógeno y generando la acidosis. Tradicionalmente, el ácido láctico ha sido considerado como el culpable de la fatiga, pero son los H⁺ generados por dicho ácido, los que conducen a la reducción del pH y posteriormente a la fatiga (Wilmore & Costill, 2004).

1.1.3.2.4 Desequilibrios iónicos: Se pueden llegar a producir modificaciones del pH de la fibra muscular provocadas, por alteraciones producidas en el sarcolema y en las membranas del retículo sarcoplasmático, produciendo cambios en la permeabilidad de iones y agua, afectación a la polaridad de la membrana, a la génesis de potenciales de acción, y a la excitabilidad de la fibra, produciendo una deshidratación de la fibra muscular y una dificultad para salida del Calcio, y por tanto disminuyendo la contractilidad de la fibra muscular (Barbany, 2006).

1.1.3.2.5 Daño muscular: Hace referencia a la estimación del grado de daño en la membrana celular, así como en la rotura de las miofibrillas, que va a generar una reacción inflamatoria dentro de la misma, provocando así un descenso en la capacidad para generar fuerza y con ello una disminución del rendimiento además del dolor, debilidad y rigidez muscular (Nédélec et al., 2012) como una de las posibles consecuencias del ejercicio físico.

Este dolor y rigidez muscular tendrán una aparición entre las 24 y 48 horas después del entrenamiento. Además, estos cambios fisiológicos en el músculo, pueden darse por diversos motivos como una reanudación del ejercicio físico tras un periodo de inactividad, el inicio de un entrenamiento de fuerza, o aquellos cambios o modificaciones en el protocolo de entrenamiento, como puede ser el aumento de la duración e intensidad del mismo (Guillem et al., 2013). Destacar que el trabajo excéntrico, genera un mayor daño muscular que los propios procesos químicos de la contracción muscular (Clarkson et al., 1992).

1.1.3.2.6 Capacidad muscular de producir fuerza: Hace referencia a un indicador válido y fiable para valorar la fatiga muscular, así como la recuperación post-ejercicio (Minnet & Duffield, 2014). Para obtener dicho parámetro, podemos medir la máxima contracción voluntaria (MCV) utilizando tests de fuerza o electromiografía (EMG) (Froyd et al., 2013). Autores como Rampinini et al. (2011) afirman en su estudio, que esta capacidad para generar fuerza, puede estar relacionada por factores centrales y/o periféricos, debiendo para ello, analizar aquellas propiedades contráctiles del cuádriceps, a través de estimulaciones eléctricas, así como la MVC a través del test de fuerza de extensión de rodilla.

1.1.3.2.7 Temperatura localizada: Es un indicador de fatiga neuromuscular, que puede analizarse a través de una de las técnicas novedosas no invasivas que permiten medir, valorar e interpretar por medio de imágenes térmicas de alta resolución (IRT, Infrared Thermography) la temperatura corporal y con ello, obtener una información detallada de la temperatura de las estructuras internas de organismo antes, durante y después del ejercicio (Hildebrandt et al., 2010). Según los autores Barnes y Mauer (1946), con la Termografía infrarroja estimamos la

temperatura de las distintas regiones corporales, a través de la radiación infrarroja liberada por la actividad metabólica y el flujo sanguíneo del cuerpo humano.

Actualmente, hay un interés creciente por la utilización de la Termografía para monitorizar la evolución en la recuperación de lesiones, así como la recuperación tras la realización de ejercicio físico (Marins et al., 2014), ya que a través de la identificación de determinadas variaciones en la temperatura, se pueden localizar posibles lesiones (Keyl & Lenhart, 1975). Esto se debe, a la reacción inflamatoria en el organismo con un aumento del flujo sanguíneo debido a una mayor activación celular (Sampedro et al., 2012) que provoca imágenes hipertérmicas (Mangine et al., 1987), mientras que por el contrario, se identificarán imágenes hipotérmicas cuando hay procesos degenerativos (Garagiola & Giani, 1990). Además, este mismo autor, afirma que la Termografía infrarroja no va a revelar modificaciones desde el punto de vista anatómico, sino el estado actual de los tejidos.

Los autores Gómez-Carmona et al. (2010) indican que si pasadas las 24 horas de recuperación, una de las zonas corporales no disminuye su temperatura como su antagonista, es debido, a que existe una mayor actividad metabólica en dicha zona, precisando de más tiempo para su recuperación, identificando con ello, un posible daño en el deportista, aunque éste no presente dolor.

1.1.4. Evaluación y control de la fatiga.

Según Verjoshanski (1990), la carga es “El trabajo muscular que implica en sí mismo el potencial de entrenamiento derivado del estado del deportista, que produce un efecto de entrenamiento que lleva a un proceso de adaptación”. Esta variable está determinada por las diferentes formas del volumen e intensidad, pudiéndose obtener diferentes manifestaciones de la carga tanto en kilogramos como en tiempo. Partiendo de la base de que la carga interna se experimenta a partir de la carga externa, definimos esta última como aquellas acciones que son medibles y cuantificables como por ejemplo la aceleración, intensidad, tiempo de acción y de pausas, número de desplazamientos, la velocidad o la distancia recorrida (Scott et al., 2013) a

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

través de la utilización de GPS, encoders o videocámaras (Wehbe et al., 2013). Por otro lado, la carga interna, hace referencia a la respuesta fisiológica que experimentan los deportistas ante determinados estímulos físicos tales como la frecuencia cardíaca, el consumo máximo de oxígeno o incluso los niveles de ácido láctico en sangre entre otros (Alexiou & Coutts, 2008). Por todo ello, pasamos a explicar los diferentes métodos para monitorizar aquellas variables tanto de la carga interna como la externa.

1.1.4.1. Métodos para monitorizar la carga externa:

1.1.4.1.1 Parámetros cinemáticos y dinámicos: En la actualidad existen numerosos avances tecnológicos con la aparición de nuevos dispositivos en los que los entrenadores pueden comprender, analizar e interpretar mejor las cargas de entrenamiento. Ya sea en deportes de fuerza (encoder lineal Smart Coach®, Chronojum®, Vitrube®) como de resistencia (PowerTap TM®), existe la posibilidad de adquirir una herramienta capaz de controlar estas variables como métodos para monitorizar la fatiga. González-Badillo et al. (2017) afirma que una disminución de la velocidad ante una carga determinada, refleja el grado o nivel de fatiga, ya sea de carácter mecánico (pérdida de velocidad media en la serie, pérdida de altura en saltos verticales (SJ y CMJ), metabólicos (Concentración amonio, lactato, etc.) y hormonales (testosterona, cortisol, etc.). Unos años antes, Gonzalez-Badillo (1991) afirmaba que si pudiéramos medir la velocidad máxima de los movimientos cada día y con información inmediata, éste sería posiblemente el mejor punto de referencia para saber si el peso es adecuado o no.

1.1.4.1.2 Sistemas de posicionamiento en el tiempo: Los sistemas de posicionamiento (GPS) como herramienta fundamental en los deportistas profesionales, ha conllevado un gran avance en el mundo de rendimiento. Con esta metodología, se puede ver incluso en tiempo real, factores como la distancia recorrida, la velocidad, la duración así como el tipo de actividad que está realizando. Actualmente en el mercado, existen diferentes marcas como Polar® o ProZone TM® que facilitan este servicio, con el objetivo de analizar las variables antes mencionadas, así

como también los niveles de fatiga alcanzados por el deportista a través de la frecuencia cardíaca.

1.1.4.1.3 Pruebas funcionales de medición: Podemos evaluarla a través de test o pruebas de salto (SJ y CMJ), pruebas de carrera en sprint o incluso a través de dinamometría isocinética. Para las pruebas de saltos, se necesitarán dispositivos como plataformas de fuerza (Kistler®, Dinascan®), plataformas de contacto (Boscosystem®), así como una maquina isocinética para la dinamometría (Easytech®), aunque en la mayoría de los estudios, se utilizan más las plataformas de fuerza o de contacto debido a que resulta menos costoso además de reproducir mejor los movimientos específicos de cada deporte. Con las variables obtenidas, además podemos obtener los efectos producidos por la fatiga muscular, comparando las mediciones tanto antes como después del entrenamiento o prueba. Referente a los saltos, el salto en contra movimiento (CMJ, Countermovement jump) se fundamenta en la medición del tren inferior donde el deportista realiza un salto desde una posición bípeda sin flexionar las rodillas para posteriormente realizar una flexo-extensión de rodillas (ángulo de 90°) lo más potente posible y realizar el salto con la mínima parada entre las fases excéntrica y concéntrica del movimiento para tomar impulso. Los brazos se mantienen detrás de cuerpo para no generar una ayuda en el impulso. Se utiliza para medir la fatiga neuromuscular a través de la potencia (W). Asimismo, mencionamos además el salto desde sentadilla con 90° en la articulación de la rodilla (SJ, Squat jump), que es igual que el anterior pero la ejecución del salto se inicia desde la posición de sentadilla (ángulo de 90°) y con las manos situadas en las caderas para evitar la ayuda de impulso (Nédélec et al., 2012). Por otro lado, los saltos verticales hacen referencia al desplazamiento de la carga (propio peso corporal) y gravitacionalmente constante (Murphy & Wilson, 1997), haciendo que dicho patrón de movimiento sea una de las formas más válidas para monitorizar la fatiga neuromuscular (Meylan et al., 2008). Por tanto, los saltos verticales más utilizados en el mundo de la investigación son el Countermovement Jump (CMJ), Squat Jump (SJ) y Drop Jump (DJ) (Twist & Highton, 2013). Sin embargo, hay estudios contradictorios en referencia a la relación de los saltos verticales con respecto a la fatiga neuromuscular. Por un lado, Gathercole et al. (2015) afirmo en su estudio que la fatiga neuromuscular seguía manifestándose a través del salto vertical (CMJ y DJ) incluso

hasta las 72 horas después del entrenamiento al igual que Jiménez-Reyes et al. (2016) que además del relacionar el CMJ, identificó la fatiga con el nivel de lactato y amonio en sangre. En contraposición con esto, Freitas et al. (2014), en su estudio en jugadores de voleibol, afirman que el salto CMJ no hace referencia a una variable sensible para relacionarlo con la fatiga neuromuscular ya que se ha ido aumentando la carga de entrenamiento al igual que Póvoas et al. (2014), en su estudio con jugadores de balonmano.

Miras-Moreno (2020) en su artículo, realiza una revisión sistemática referente a si la altura en el salto CMJ es válida y fiable para relacionarla con la fatiga neuromuscular, indicando que el CMJ es una herramienta fiable para medir la fatiga neuromuscular tanto a lo largo de una temporada como en una sesión de entrenamiento, siempre y cuando las mediciones se hagan en base a unos estándares validados y correctos.

1.1.4.2. Métodos para monitorizar la carga interna:

1.1.4.2.1 Rate of perceived exertion (RPE): Este modelo fue propuesto por el sueco Borg y Noble (1974) donde la escala original fue planteada con unos rangos comprendidos entre 6 y 20, y que con el paso de los años se adaptó de 0 a 10 aunque ambas están validadas y se correlacionan de manera óptima con la intensidad del ejercicio (Borresen & Lambert, 2008). Este modelo se fundamenta en que la subjetividad en la intensidad del esfuerzo, debe ser muy similar para todos los sujetos, en la cual se describen unas escalas verbales numéricas, asociadas a unas respuestas escalonadas gradualmente en intervalos (Borg & Kaijser, 2006). Por tanto, la finalidad de esta escala, hace referencia a la cuantificación de la carga de entrenamiento que percibe el deportista o el grado de fatiga alcanzado durante y una vez finalizado el entrenamiento o el estímulo (Borg, 1998). Mencionar además, que la escala de esfuerzo percibido de Borg es muy utilizada en pruebas de laboratorio, pero además se utiliza mucho en pruebas de campo, tanto en entrenamientos como en competición (Brink et al., 2010).

En la bibliografía podemos encontrar otras tipologías de escalas subjetivas de esfuerzo percibido, de manera que han ido actualizando la original. Con respecto a la escala original RPE

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

6-20 desarrollada por Borg (1970), indicar que consta de 15 puntos, donde 6 es el indicador de menor y 20 el de mayor valor. Esta escala, está diseñada para proporcionar datos como la frecuencia cardíaca (FC), la intensidad del estímulo, o el consumo de oxígeno (VO₂), como por ejemplo para el trabajo aeróbico en un cicloergómetro (Borg, 1970). Seguidamente, aparecieron las escalas de Borg CR10 (Borg & Kaijser, 2006) y CR100 (Borg & Borg, 2002) las cuales se diferencian por tener unas indicaciones verbales y numéricas con cada nivel de intensidad (Borg & Kaijser, 2006).

1.1.4.2.2 Frecuencia cardíaca y consumo de oxígeno: El control y evaluación de la frecuencia cardíaca, hace referencia a uno de los protocolos más utilizados para determinar el estado actual del deportista. Esta variable está estrechamente relacionada con el consumo máximo de oxígeno (VO₂Máx) y es muy utilizada para controlar la intensidad del entrenamiento. Además, la frecuencia cardíaca está muy relacionada con factores como la hidratación del deportista, la temperatura ambiente, así como la utilización de algún tipo de medicación. En la actualidad, cada vez aparecen más marcas comerciales que sacan nuevos productos de todos los precios midiendo esta variable como Polar®, Garmin® o incluso novedosas aplicaciones móviles.

1.1.4.2.3 Consumo de oxígeno post-ejercicio: También conocido como EPOC, hace referencia a la medición del consumo de oxígeno (ml/kg/min), tras la realización de un ejercicio físico de alta intensidad. En esta variable, se muestran los cambios en el estrés homeostático del ejercicio físico a través de un analizador de gases (Hargreaves, 2005).

1.1.4.2.4 Método TRIMP: También llamado "Training Impulse" (Impulso de entrenamiento) que aunque puede ser considerado como un método de carga externa, también es considerado como un método de carga interna, puesto que combina parámetros de ambos métodos. Es por ello, por lo que este método hace referencia a un método de control de la carga de entrenamiento, el cual fue desarrollado por Banister en 1975. Esta metodología, la cual se

distingue entre sexos, se basa en el incremento de la frecuencia cardíaca (FC), teniendo en cuenta la duración del entrenamiento, multiplicado por un factor de intensidad. Este método, el cual ha sido comprobado y desarrollado en numerosas investigaciones científicas, resulta muy sencillo de aplicar necesitando únicamente un pulsómetro. A continuación, exponemos la fórmula modificada por Morton et al. (1990).

$$TRIM = Duración (mn) \times (Factor A \times (FC media - FC Reposo) \times 2.718 \exp (Factor B \times (FC media - FC Reposo))$$

Hombres: Factor A = 0.64 Factor B = 1.92

Mujeres: Factor A = 0.86 Factor B = 1.67

1.1.4.2.5 Concentración de lactato en sangre: La acumulación del lactato en sangre así como la acidosis sanguínea y muscular, se caracterizan como una de las consecuencias fundamentales de la fatiga neuromuscular. A lo largo de los años, diversas investigaciones se han centrado en analizar los procesos de recuperación adecuados, con el objetivo de disminuir lo más rápido posible la acidosis sanguínea, así como la acumulación de lactato en sangre en el organismo. Según Koizumi et al. (2011), los ejercicios aeróbicos de baja intensidad son los más utilizados para llevar a cabo una mejor recuperación activa.

De igual modo, es sabido que el entrenamiento de alta intensidad con una duración prolongada, precisa de la glucólisis anaeróbica para aportar energía al organismo, con el consecuente aumento en la acumulación del ácido láctico (Westerblad et al., 2002), el cual se disocia en la acumulación de lactato e iones hidrógeno, siendo la causa principal de la fatiga muscular. Sin embargo, según Nedelec et al. (2012), la eliminación de esta acumulación de lactato después del entrenamiento, no implicaría necesariamente un incremento en el rendimiento posterior, pues existen estudios que muestran un descenso de la concentración de lactato tras la realización de una recuperación activa, a pesar de que no haya una recuperación en el rendimiento (Bond et al., 1991). El concepto de que el lactato y la acidosis muscular sean la

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

causa de la fatiga muscular, está cambiando con los avances y la proliferación de estudios científicos, los cuales han sido discutidos por diferentes autores (Westerblad et al., 1997) que identifican que esta reducción tiene un efecto insignificante en la contracción muscular (Westerblad et al., 2002). De esta manera, el incremento en la acumulación del lactato además del aumento de iones hidrógeno, no resultan ser los principales causantes de la aparición de la fatiga muscular (Cairns, 2006).

1.1.4.2.6 Variabilidad de la frecuencia cardíaca: Hace referencia a la variación de la frecuencia del latido cardíaco durante un tiempo determinado, como son el reposo y el post-ejercicio para poder medir su variabilidad (Alonso et al., 1998). En la actualidad, encontramos multitud de medios para analizar dicha variable como un electrocardiograma, pulsómetro, Smartphone, etc. (Thorpe et al., 2017), midiendo la variabilidad de la frecuencia cardíaca detectada entre cada una de las ondas R calculando el tiempo o intervalo entre ellas (Intervalo R-R) (Rodas et al., 2008).

1.1.4.2.7 Cuestionarios y diarios: Hacen referencia a un medio simple, accesible y económico para poder determinar la carga de entrenamiento, así como las respuestas fisiológicas del deportista. Sin embargo, esta metodología resulta muy subjetiva debido a que el deportista puede aportar los datos a través de las manipulaciones o sobreestimaciones. Entre los cuestionarios que podemos encontrarnos, destacamos POMS, relacionado con los estados de ánimo, REST-QSport, relacionado con la recuperación del estrés, DALDA, relacionado con el análisis de las demandas de vida de los atletas y por último TQR relacionado con una escala de recuperación total del deportista. También destacamos las escalas Omni Test, las cuales hacen referencia a una evolución de las escalas RPE que son muy aplicables a todo tipo de personas y deportistas. Estas escalas, tienen la particularidad de que presentan una imagen de un sujeto realizando diferentes ejercicios ya sea de carrera, ciclismo o levantamiento de pesas entre otros a diferentes intensidades de trabajo del 1 a 10, acompañados y adaptados de unos descriptores

específicos tanto visuales como verbales (Robertson, 2004).

1.1.4.2.8 Sueño: La falta o pérdida de sueño, es un indicador muy importante y significativo sobre la pérdida de rendimiento en el deporte, así como en la motivación, percepción del esfuerzo, cognición u otras funciones biológicas cada vez más utilizado en los deportistas. Por tanto, resulta muy interesante y útil, el análisis de esta variable a través de diarios simples, que indican las horas de sueño así como su calidad. Destacamos también otros métodos no invasivos como la actigrafía, basados en un reloj de pulsera con un acelerómetro, que nos proporciona información y datos referentes a la hora de acostarse y despertarse, tiempo necesario para conciliar el sueño, así como la eficiencia y calidad del sueño.

1.1.4.3. *Métodos de valoración del dolor.*

A lo largo de los años, se ha incrementado el interés en evaluar o medir, así como la cuantificación del dolor o la fatiga muscular y con ello, establecer de forma subjetiva la intensidad del esfuerzo durante y después la realización del entrenamiento. Los principales métodos de valoración del dolor utilizados en el deporte de rendimiento son las siguientes:

1.1.4.3.1 Dolor muscular de inicio retardado (DOMS) y escala visual analógica (EVA): Hacen referencia a escalas para determinar el grado o nivel de percepción de dolor muscular tras la realización del ejercicio. Su medición, se realiza expresando el dolor obtenido en la escala EVA del 1 al 10, siendo 1 más leve y 10 más fuerte, pudiendo expresarse tanto en centímetros como en milímetros. Esta metodología de evaluación, resulta menos costoso e invasivo que otras metodologías (Wahl et al., 2017).

1.1.4.3.2 Percepción subjetiva del dolor (VAS Pain): Hace referencia a una escala analógica visual de izquierda (ausencia de dolor) a derecha (máximo dolor) donde el sujeto, debe indicar dentro de esos valores el nivel actual de dolor. El examinador mide la distancia en centímetros (de 0 a 10) o en milímetros (de 0 a 100) desde el punto de anclaje sin dolor. Sin embargo, no

existen muchos estudios que apoyen la precisión de esta metodología al medirse en milímetros.

1.1.4.3.3 Algómetro o dolorímetro: Hace referencia a una técnica que permite explorar y analizar la sensibilidad a estímulos mecánicos sobre determinadas estructuras musculares profundas, a través de la presión localizada en un músculo con un disco circular en el que aparece las medidas de presión y con una punta de goma de superficie circular para transferir la fuerza de presión a los tejidos profundos del músculo progresivamente a un kilogramo por segundo. Es una herramienta que además de obtener datos cuantitativos no invasivos, son cómodamente reproducibles, prácticos y de fácil transporte.

1.1.5. La Fatiga y su relación con el rendimiento deportivo:

La fatiga muscular va a depender fundamentalmente de las variables del entrenamiento tales como la carga, la intensidad, la duración, la densidad de los ejercicios ya sean contracciones isométricas o isotónicas, relacionadas con el tipo de fibras musculares a utilizar y relacionadas con la disponibilidad inicial de sustratos energéticos.

Es por ello, por lo que como investigadores, debemos tener muy presentes los principios propios del entrenamiento deportivo, puesto que resultan necesarios para una mejor comprensión de todos éstos conceptos.

El principio de sobrecarga, hace referencia a uno de los principios más importantes en el proceso de entrenamiento y rendimiento deportivo. Con este principio, se generan adaptaciones en el organismo tras la implantación de una serie de estímulos a los que el deportista debe adaptarse para poder avanzar a un nivel superior, (principio de adaptación) y con ello incrementar el rendimiento (Seyle, 1950).

Por tanto, con la sesión de entrenamiento deportivo, en el organismo se producirán una serie de cambios en la homeostasis, llevando a producirse una serie de ajustes fisiológicos, con el objetivo de mantener de nuevo esa situación de equilibrio en el mundo interno como el aumento de la FC, aumento de la ventilación pulmonar, flujo metabólico alterado, redistribución del flujo sanguíneo y un incremento de la temperatura corporal (Hauswirth & Mujika, 2013). Al finalizar la sesión de entrenamiento, las adaptaciones agudas volverán a los niveles iniciales al ejercicio, pero en función de la intensidad, duración y modalidad, la recuperación tendrá una mayor o menor duración en el tiempo. Además, esa recuperación debe ser óptima para poder volver al entrenamiento en las mejores condiciones posibles y permitir que aparezca el fenómeno de la supercompensación y con ello mejorar el rendimiento del deportista (Seyle, 1950).

En la literatura científica, se han realizado numerosas investigaciones de cómo afecta la fatiga muscular en el rendimiento del deportista, llevándose a cabo en multitud de deportes así como diferentes protocolos de entrenamiento y poder con ello, ver los efectos y las adaptaciones producidas. Pareja-Blanco et al. (2019), compararon diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza con cargas submáximas, con el objetivo de identificar con qué porcentaje de carga de trabajo, se conseguía una mayor pérdida de velocidad tanto en las siguientes repeticiones como en las siguientes series ya que la velocidad está asociada directamente con la fatiga muscular. Sin embargo, otra variable a analizar para identificar la magnitud de la fatiga muscular es con parámetros fisiológicos como la concentración de lactato en sangre o parámetros funcionales como pueden ser además de la velocidad, pues la aceleración o la potencia de los saltos verticales (SJ y CMJ), como en el estudio que realizaron Mate-Muñoz et al. (2017), en deportistas de crossfit comparando dichas variables en tres de sus modalidades de WOD (work of the day) como son los gimnásticos (pull-ups, push-ups y air squats), acondicionamiento metabólico (dobles saltos a la comba) y levantamientos olímpicos (power cleans), encontrando diferencias significativas en cada variable y entre los diferentes tipos de entrenamiento. También Raeder et al. (2016), con el mismo objetivo de estudio, se ocuparon de identificar las respuestas que se producían en el organismo a nivel neuromuscular, comparando distintos ejercicios o variantes de sentadillas (peso libre, Yoyo Squat, sobrecarga excéntrica, drop jump, y pliometría)

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

con cargas muy similares, encontrando en sus resultados que a nivel metabólico, las sentadillas en un dispositivo yoyo y con sobrecarga excéntrica, se generaron unos mayores indicadores de fatiga.

Por tanto, vemos que en la literatura científica existe mucha variedad de estudios en relación a un mismo objetivo, que es analizar los procesos y causas de la fatiga, de manera que existe la necesidad de que los preparadores físicos y entrenadores encuentren ese equilibrio entre las cargas de entrenamiento y la correcta recuperación para conseguir el óptimo rendimiento del deportista y con ello, retrasar la aparición de la fatiga muscular.

1.2. ENTRENAMIENTO DE LA FUERZA MUSCULAR:

1.2.1. Definición de fuerza muscular.

El entrenamiento de la fuerza ha demostrado que con su correcta utilización, se obtienen mejoras significativas en el ámbito de la salud y de calidad de vida tanto en personas sanas como en personas con patologías crónicas (Pesta et al., 2017). Además, el entrenamiento de la fuerza, hace referencia a una modalidad de ejercicio físico recomendado, con el objetivo de mejorar o potenciar el fitness neuromuscular, el rendimiento atlético e incrementar la salud de las personas (Schoenfeld & Grgic, 2018).

En la Literatura científica, se han ido desarrollando a lo largo de los años numerosas definiciones del concepto de la fuerza, pudiendo analizarse con el paso de los años desde diferentes perspectivas, y con ello, convertirse en objeto de estudio en áreas como el rendimiento, biomecánica, anatomía, fisiología, etc.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Autores como González-Badillo y Ribas (2002), afirman que en el ámbito de la actividad física y el deporte, el concepto que más nos interesa como profesionales del ejercicio físico y de rendimiento es el de fuerza aplicada, que se obtendrá como resultado de la acción muscular sobre resistencias externas, como el peso corporal o resistencia externa al deportista.

En esta línea, autores como Seirul-lo (1998), definen la fuerza como la capacidad base o de referencia de todas las otras capacidades, lo que quiere decir que el resto de capacidades físicas básicas, deben entrenarse partiendo del entrenamiento de la fuerza.

Asimismo, Tous (2005), nos indica que la fuerza es el producto las diferentes acciones musculares y que puede clasificarse en base a tres parámetros, como el nivel de fuerza aplicada (expresado en Newton), el tiempo en alcanzar esos niveles de fuerza, así como el tiempo el cual se puede mantener ese nivel de fuerza.

De igual modo, podemos definir el concepto de fuerza muscular desde varios puntos de vistas distintos:

- Mecánico: mencionamos a autores importantes como Siff y Verkhoshansky (2000), que definen la fuerza como la capacidad del músculo o de un grupo de músculos de generar tensión bajo condiciones específicas. Otra definición del concepto de fuerza procedente de González-Badillo (1991), hace referencia a toda causa capaz de modificar el reposo o movimiento de un cuerpo, permitiendo deformar o modificar su aceleración, así como iniciar o detener el movimiento, aumentar o reducir su velocidad y generar un cambio de dirección. Fleck y Kraemer (2014) lo definen como el entrenamiento que lleva a cabo un ejercicio que requiere un movimiento o la intención de éste contra una fuerza contraria. Por último, Mirella (2009) define el concepto de fuerza como la capacidad del ser humano, que permite vencer una resistencia y

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

oponerse a ella con un esfuerzo de la tensión muscular.

- Fisiológico: Desde esta perspectiva, mencionamos a González-Badillo y Gorostiaga (2002), los cuales definen la fuerza como la capacidad del tendón de producir una tensión cuando el músculo se activa o se contrae. También mencionamos a Verkhoshansky (2000), el cual define la fuerza como una capacidad funcional producida por el sistema nervioso central y sistema muscular permitiendo generar una tensión o contracción.
- Deportivo: La fuerza en el ámbito deportivo, podemos definirla según González-Badillo y Ribas (2002) como la manifestación externa (fuerza aplicada) que se hace de la tensión interna generada en el músculo o un grupo de músculos en un tiempo determinado. Es por ello por lo que González-Badillo (2000) incorpora el concepto de fuerza aplicada que abarca la acción muscular y su resultado sobre una resistencia externa, ya sea el propio peso corporal o un peso adicional. Adicionalmente, establece el concepto de fuerza útil, que hace referencia a la aplicación de la fuerza aplicada en un gesto deportivo.

1.2.2. Manifestaciones de la fuerza:

Las acciones musculares en el ser humano son muy variadas y como profesionales del ejercicio físico, debemos conocerlas a la perfección para poder realizar correctos y eficientes programas de entrenamiento de la fuerza y con ellos conseguir las adaptaciones fisiológicas programadas. Según Tous (1999), las manifestaciones de la fuerza no deben entenderse de forma pura, por lo que es cambiante durante todo el proceso de entrenamiento. Es por ello, por lo que se establece una clasificación más detallada en base a las manifestaciones de la fuerza:

- Manifestación estática: Hace referencia a aquella acción en la que no existe un desplazamiento del miembro, por lo que tampoco se produce una rotación articular, aunque sí se producen pequeños acortamientos de las fibras musculares (Plowman & Smith, 2013). Además, Verkhoshansky (1996), afirma que en la acción isométrica, la magnitud de la tensión del músculo es igual a la resistencia externa, no variando su longitud. Por tanto, a pesar de que no

existe un trabajo a nivel mecánico siendo la velocidad igual a cero, si lo hay a nivel intramuscular y metabólico. Diferenciamos 2 tipos:

- Fuerza isométrica máxima: Contracción voluntaria máxima que realiza el deportista ante una resistencia insalvable.
 - Fuerza isométrica submáxima: Contracción voluntaria submáxima contra una resistencia superable.
- Manifestación dinámica: Hace referencia a aquella acción donde se produce una contracción muscular y dándose, un movimiento del sistema musculo-esquelético y con ello y aumento o disminución del ángulo articular (Knutton & Komi, 2003). Debido a la existencia de un acortamiento de las palancas a nivel muscular, se produce un movimiento a raíz de la fuerza generada. Las acciones producidas en estas manifestaciones son acciones concéntricas donde el músculo es capaz de producir un acortamiento o aproximación de las estructuras, ante una carga determinada (Brinckmann et al., 2002), y las acciones excéntricas en las que músculo se alarga, relacionándose con potencias negativas, debido a que el músculo absorbe energía (Brinckman et al., 2002), siendo por lo tanto responsable de la deceleración. En esta manifestación dinámica, diferenciamos varios tipos:
- Fuerza dinámica máxima: Hace referencia a la manifestación de la fuerza que consigue movilizar la mayor carga posible sin límite de tiempo y que no depende del componente elástico del músculo.
 - Fuerza máxima dinámica relativa: Hace referencia al valor máximo de fuerza que se puede aplicar en base al porcentaje de fuerza dinámica máxima o de la isométrica máxima.
 - Fuerza inicial: Hace referencia a la capacidad de desarrollar la mayor fuerza posible al inicio de una acción muscular concreta. Está considerada como una fuerza independiente de la resistencia externa, resultando invariable ante cualquier resistencia (Siff & Verkhoshansky, 2000).
 - Fuerza de aceleración: Hace referencia a la capacidad de los músculos en generar tensión

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

de manera muy rápida una vez que la acción muscular ya ha comenzado. Puede ocurrir al poco tiempo de desarrollar una acción isométrica o al comienzo de una acción dinámica.

- Fuerza explosiva máxima: Hace referencia a la capacidad de efectuar la mayor cantidad de fuerza en el menor tiempo posible partiendo desde una posición estática.

- Manifestación reactiva: Hace referencia al efecto que produce la fuerza muscular por un ciclo de acortamiento-estiramiento (CEA). Asmussen y Bonde-Petersen (1974), demostraron con su estudio, que durante la acción negativa o excéntrica de un movimiento, se almacena energía elástica, pudiendo ser liberada si ésta, va inmediatamente seguida de una acción positiva o concéntrica. Esto puede deberse a tres razones según Ettema et al. (1990). En primer lugar, es debido a la interacción entre tendón y músculo. En segundo lugar, es en relación a la potenciación del material contráctil y en tercer lugar, en relación a la liberación de energía elástica ocasionada por la elongación del tejido tendinoso y reutilizado por dicho material contráctil.

 - Fuerza elástico-explosiva: Hace referencia a la manifestación de la fuerza en la que el ciclo estiramiento-acortamiento es lento y en los que participa el componente elástico del músculo. No se realiza a gran velocidad debido a largos desplazamientos angulares de las articulaciones.

 - Fuerza reflejo-elástico-explosiva: Hace referencia a la manifestación de la fuerza en la que el ciclo estiramiento-acortamiento es rápido, realizándose una flexión de las extremidades principales (Fase excéntrica), pero con una amplitud o rango limitado y una velocidad muy alta, permitiendo una gran tensión en muy poco tiempo.

1.2.3. Bases fisiológicas de la fuerza muscular.

A continuación, vamos a desarrollar los mecanismos que se producen en el organismo a nivel fisiológico para conseguir la manifestación de la fuerza. Éstos son:

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

○ Mecánica muscular: La consecución de la fuerza en el organismo, se produce cuando los sarcómeros se encuentran en una longitud óptima, permitiendo con ello, el mayor número de enlaces entre la actina y la miosina (MacIntosh et al., 2012). Sin embargo, los tipos de acciones musculares condicionan estos enlaces o la formación de puentes cruzados de actina y miosina. Por ejemplo, en un ejercicio con un ciclo de estiramiento-acortamiento, la musculatura agonista desarrolla una fuerza previa a la acción concéntrica (Bobbert & Casius, 2005) debido al componente elástico y contráctil del músculo (Fukashiro et al., 2005) y generando por tanto una mayor fuerza que en otros ejercicios sin esa sobrecarga excéntrica.

○ Morfología muscular: Resulta una realidad de que los sujetos que disponen de un mayor grosor a nivel muscular, son los que tienen más fuerza. Los factores morfológicos o estructurales, están muy relacionados con la producción de la fuerza en el organismo. Asimismo, el tipo de fibra muscular o la angulación de peneación, van a determinar el mayor o menor desarrollo de la fuerza (Aagaard et al., 2007), pero sin embargo, el factor principal a nivel estructural para la producción de fuerza es la sección transversal del músculo (Malisoux et al., 2006). Esto ha quedado demostrado en estudios longitudinales donde se observa que los beneficios obtenidos después de varias semanas de entrenamiento de fuerza, son superiores al aumento de la masa muscular, de manera que no sólo la hipertrofia muscular contribuye a la mejorar la fuerza, sino que además existen otros factores que también intervienen. Asimismo, los factores por las que se produce hipertrofia muscular tras un protocolo de entrenamiento de fuerza, son el aumento del número y tamaño de las miofibrillas así como del tejido conectivo, aumento de la vascularización, así como del tamaño y número de fibras musculares. Por otro lado, la rigidez de las partes blandas como el tendón, se correlaciona con un peor rendimiento en acciones explosivas debido a la tensión en el desplazamiento de las fáscias (Bojsen-Møller et al., 2005).

○ Factores neurales: Históricamente, no se disponía de mucha información sobre la capacidad de activación neural de los músculos y sus adaptaciones en el entrenamiento de fuerza. La activación muscular por parte del sistema nervioso central (SNC), está estrechamente relacionada con el reclutamiento de las unidades motoras, frecuencia de impulsos, sincronización y

coordinación inter-muscular, por lo que según sea la magnitud de éstas, se producirá más o menos nivel de fuerza (Cormie et al., 2011). Además, resulta muy necesaria una correcta activación de la musculatura agonista, antagonista y sinergista para conseguir la mayor producción de fuerza (Folland & Williams, 2007). Es por ello por lo que la capacidad de producir fuerza no solo depende del tamaño de la musculatura, sino de la capacidad del sistema nervioso para activarlos. Asimismo, la producción de fuerza máxima de un músculo requiere que todas sus unidades motoras sean activadas teniendo en cuenta tres características que son:

- Cada neurona motora produce una fuerza de contracción de sus fibras musculares, la cual varía según la frecuencia con la que se estimule su nervio motor.
 - Cuando se realiza una contracción isométrica submáxima de un músculo, no se reclutan todas las unidades motoras. En primer lugar, se activarán las de un tamaño inferior, las cuales inervan a las fibras lentas. En segundo lugar, se activarán las de mayor tamaño cuando se precisa aplicar más fuerza (fibras rápidas).
 - En movimientos explosivos, ejecutados a la máxima velocidad, la frecuencia y velocidad de estimulación del nervio es mucho mayor que la frecuencia necesaria para obtener la máxima tensión de las fibras musculares inervadas por su nervio motor.
- **Entorno muscular:** Otras variables importantes a tener en cuenta en la producción de fuerza por parte del músculo, hace referencia a la acumulación de potasio extracelular en la depresión de la excitabilidad de la neurona motora, que se dan en situaciones concretas de fatiga muscular (Allen et al., 2008). Además, las modificaciones o cambios hormonales agudos, pueden llegar también a afectar la producción de fuerza, puesto que aquellos deportistas con mayores incrementos en la secreción hormonal ante un estímulo, serán capaces de generar una mayor fuerza y potencia (Hamdi & Mutungi, 2010). Por tanto, los cambios hormonales forman una parte muy importante y es debido a una serie de razones que son:
- Las hormonas anabolizantes como la testosterona, insulina, o la hormona del crecimiento, presentan unos efectos metabólicos y celulares similares a los observados en el entrenamiento de fuerza.
 - En los distintos tipos de entrenamientos de fuerza, existe un aumento en la concentración sanguínea de las diferentes hormonas mencionadas anteriormente.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Las concentraciones basales de hormonas anabolizantes, evalúan el balance hormonal anabólico-catabólico tras el entrenamiento.

1.2.4. Adaptaciones producidas por el entrenamiento de la fuerza.

El entrenamiento de la fuerza, está enormemente apoyado y aceptado por la comunidad científica así como por los entrenadores y atletas, en los programas de entrenamiento deportivo y preparación física, en los que el objetivo es la mejora de la fuerza y potencia muscular, así como la prevención de lesiones entre otras (Ribeiro et al., 2015). Fundamentalmente, los entrenamientos de fuerza se han centrado tradicionalmente en patrones o esquemas basados en datos científicos empíricos, así como en esquemas de repeticiones como es el entrenamiento con cargas tradicional (Todd et al., 2012).

Es por ello, por lo que los programas de entrenamiento de la fuerza provocan unas adaptaciones en el organismo, las cuales serán diferentes entre las personas, y estarán determinadas en función del nivel de entrenamiento o incluso de la edad. Un deportista con un buen estado de forma, precisará de un programa de entrenamiento más exigente que una persona inactiva la cual no hace ejercicio físico de manera regular.

Con el entrenamiento con cargas, uno de los objetivos que pretendemos es que la aplicación de las cargas de entrenamiento, generen una serie de estímulos y unas adaptaciones fisiológicas en el organismo, para obtener unas mejoras en el rendimiento. Por tanto estas adaptaciones se agrupan en dos bloques:

- Adaptaciones estructurales: Hacen referencia a aquellas adaptaciones producidas en las distintas estructuras involucradas (masa muscular) en el proceso de entrenamiento. En referencia

a los elementos contráctiles del músculo, se pueden dar dos posibilidades que son la hipertrofia y la hiperplasia. La primera, es entendida como el crecimiento de la fibra muscular como consecuencia de un incremento del número y tamaño de las miofibrillas (Schoenfeld, 2013), siendo el protagonista del crecimiento transversal del músculo. Diferentes estudios han demostrado que la hipertrofia más acusada se produce en fibras tipo II después del entrenamiento de fuerza (Aagaard et al., 2001), mientras que a largo plazo, la hipertrofia se produce tanto en fibras tipo I como tipo II (Schoenfeld, 2013). Por otro lado, la hiperplasia hace referencia al aumento de las fibras musculares así como el aumento de la cantidad de tejido conectivo propio del músculo producido por el entrenamiento de la fuerza.

- Adaptaciones funcionales: Con el entrenamiento, no sólo se producen adaptaciones a nivel estructural, sino que además existen otros elementos involucrados llamados adaptaciones neurales o funcionales, los cuales están muy relacionados con el sistema nervioso y con los propios procesos de la contracción muscular.

El aumento de la sincronización de las unidades motoras y el aumento de la inervación de las neuronas motoras con las fibras musculares, así como la correcta coordinación inter e intramuscular en general, son las adaptaciones a nivel funcional que pueden llegar a darse por el entrenamiento de la fuerza (Cornie et al., 2011).

- Adaptaciones cardiovasculares: El entrenamiento de la fuerza, produce una mejora significativa en la función cardiovascular ya que su actividad aumenta en entrenamientos de alta intensidad, produciendo además un aumento en las enzimas mitocondriales, la proliferación mitocondrial, la remodelación vascular, incluso la capilarización. Es muy importante identificar las variables involucradas, como el consumo de máximo de oxígeno, economía de movimiento, frecuencia cardíaca y umbral del lactato. Determinados estudios demuestran que el entrenamiento de fuerza tradicional en personas inactivas y sedentarias, tienen efectos a nivel cardiovascular similares a determinados entrenamientos de resistencia como andar o correr. Sin embargo, otros estudios indican que el entrenamiento de fuerza no es estímulo eficaz y óptimo para la mejora del consumo máximo de oxígeno, a no ser que sean personas con muy baja

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

adherencia al ejercicio físico. Por tanto, para llegar a conseguir estas adaptaciones, se debería optar por realizar entrenamientos de fuerza en circuito compuestos por diversos ejercicios anaeróbicos que se realizan de manera continuada, con periodos de descanso muy cortos o inexistentes (Isidori, 2015).

○ Adaptaciones en la composición corporal: Con el paso de los años se van produciendo cambios en la composición corporal con aumentos importantes de tejido adiposo, así como una disminución progresiva y gradual en la masa muscular (Yañez et al., 2016). Además se producen cambios en el tejido del colágeno, aumentando la dureza y rigidez de los tendones y ligamentos siendo por tanto más propenso a las lesiones musculoesqueléticas. Debemos añadir también que se va provocando una pérdida progresiva de las fibras musculares (dinapenia), la cual está asociada a la disminución de la fuerza muscular. Es por ello, por lo que el entrenamiento de la fuerza ayuda a paliar estas adaptaciones y generando o manteniendo otras. Independientemente de la edad, con un protocolo de entrenamiento de fuerza adaptado a las características de cada persona, se puede retrasar la aparición de esta involución en la composición corporal. Además de que el entrenamiento de la fuerza está recomendado para todas las edades incluso para las personas mayores, genera importantes beneficios en todos los compartimentos como el aumento o mantenimiento de la masa muscular, disminución de la masa grasa, así como mantenimiento de la masa ósea.

1.2.5. Componentes de la carga.

La manipulación de las variables de entrenamiento, afectan de manera directa a las adaptaciones neuromusculares producidas en el organismo (Fink et al., 2018). Es por ello, por lo que la efectividad de un programa de entrenamiento de la fuerza viene determinada por la correcta aplicación de los factores o componentes de la carga como son la intensidad, volumen, frecuencia y tipología de los ejercicios recomendados, recuperación entre series y frecuencia de entrenamiento. Las diferentes combinaciones de estos componentes se traducirán en diferentes manifestaciones de la fuerza. A continuación, pasamos a describir los principales componentes de la carga:

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

1.2.5.1. *Intensidad:* Hace referencia al grado de esfuerzo que exige un ejercicio y se representa por el peso utilizado en términos absolutos o relativos, así como por el número máximo de repeticiones que se pueden realizar con un peso determinado (Izquierdo et al., 2004). La forma más común y sencilla de expresar la intensidad, ha sido a través del porcentaje de la repetición máxima (% 1RM). El autor Bompa (2003), lo define como el componente cualitativo del trabajo que realiza el deportista en un plazo de tiempo determinado. Podemos decir que la intensidad, es la variable más importante a tener en cuenta en el momento de programar un entrenamiento de fuerza (Spiering et al., 2008).

1.2.5.2. *Volumen y frecuencia de entrenamiento:* Hace referencia a la cantidad total de ejercicio realizado y esta expresado en función del número de repeticiones o kilogramos totales levantados y en un tiempo determinado (Bird et al., 2005). Autores como García-Manso et al. (1996), lo definen como la medida cuantitativa global de las cargas de entrenamiento de diferente orientación funcional que se desarrollan en una sesión, microciclo, mesociclo o macrociclo. El volumen no debe confundirse con la duración del entrenamiento. Bompa (2003) afirma que existen dos tipos de volumen. El primero hace referencia al volumen relativo, entendido como la cantidad total de tiempo que un deportista ha desarrollado durante su ciclo de entrenamiento en relación a su capacidad máxima (número de kilómetros realizados en una semana por un ciclista y dividido entre el total del mesociclo). El segundo, el cual hace referencia al volumen absoluto que mide la cantidad de trabajo de un deportista, expresado en kilómetros, repeticiones, minutos o kilogramos. Para conseguir adaptaciones fisiológicas progresivas y con ello una mejora en el rendimiento, es muy recomendable el aumento del volumen de entrenamiento ya sea incrementando el número de sesiones, la cantidad de trabajo, etc.

1.2.5.3. *Recuperación, densidad o frecuencia:* Estos términos, se identifican por medio de la alternancia temporal entre estímulo y descanso. En primer lugar, la recuperación hace referencia al lapso de tiempo que sigue a un esfuerzo determinado en el cual no se produce otro estímulo igual o mayor. Además, la recuperación resulta muy importante para poder asegurar el

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

mayor volumen de trabajo a la intensidad deseada (Schoenfeld et al., 2016). Por otro lado, la densidad hace referencia a la relación entre las fases del estímulo y las de recuperación (Bompa, 2003), es decir, es el ratio entre trabajo y descanso. Por último, la frecuencia se cuantifica en el número de sesiones en un periodo determinado de tiempo, identificado en sesiones por microciclo.

1.2.5.4. *Tipo de ejercicio:* Podemos clasificar los ejercicios según sean sus características.

○ Según la especificidad: Distinguimos los siguientes.

- *Ejercicios no específicos:* Actualmente, en la mayoría de los deportes, la preparación física se centra en aspectos más concretos del propio deporte que en la mejora de aspectos mucho más globales y no específicos, que mejoren la condición física general. Son aquellos ejercicios tradicionales como son las sentadillas, los movimientos olímpicos entre otros y que por sus particularidades tienen una gran correlación con la mejora de la condición física, muy aplicables a cada modalidad deportiva (Pareja-Blanco et al., 2014).
- *Ejercicios específicos con carga añadida:* Hacen referencia a todos los ejercicios con los gestos técnicos, patrón de movimiento y velocidades muy similares a los de los gestos realizados en la competición, con el añadido de llevar una carga externa, la cual no debe desvirtuar la técnica del ejercicio. Estos ejercicios pueden ser carreras o saltos con lastres o chalecos entre otros.
- *Gestos de competición:* También son muy importantes trabajarlas con el objetivo de desarrollar ciertas habilidades técnico-tácticas y estratégicas en situaciones de competición. De igual modo, no es recomendable utilizar solo esta metodología y dejar de lado la preparación de la condición física.

○ Número de articulaciones involucradas: Distinguimos las siguientes.

- *Monoarticulares:* Hacen referencia a aquellos que focalizan su estrés en una única articulación y grupo muscular concreto (Kraemer & Ratamess, 2004).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- *Multiarticulares*: Hacen referencia a aquellos que requieren de una activación neuromuscular más compleja así como una mayor coordinación al focalizar su estrés en más de una articulación (Kraemer & Ratamess, 2004).
- Formas de realizar el ejercicio: Distinguimos los siguientes.
 - *Peso guiado (Máquinas)*: Son más seguros y fáciles de aprender, manteniendo el mismo ROM en todo el recorrido. No implica tanta activación neuromuscular como el peso libre.
 - *Peso libre*: Permiten que el movimiento se desarrolle en los tres planos de movimiento, consiguiendo además una mayor activación en los músculos sinergista en la estabilización del movimiento.

1.2.5.5. *Orden de los ejercicios*: Hace referencia a la secuencia o el orden de los ejercicios a realizar una sesión de entrenamiento, siendo una variable muy importante, puesto que de ella depende la producción de fuerza y sus adaptaciones y la fatiga acumulada (Ratamess, 2009). Puesto a que existe una gran controversia para el correcto orden de los ejercicios, indicamos que con el objetivo de mejorar el rendimiento en los deportistas, sería recomendable realizar los ejercicios de competición al principio de la sesión cuando hay menos fatiga acumulada, pudiendo así el sistema neuromuscular asimilar mejor los efectos y las adaptaciones (Gentil et al., 2017).

1.2.5.6. *Velocidad de ejecución*: Hace referencia a una de las variables menos estudiadas en las ciencias de ejercicio, pero actualmente han crecido mucho los estudios referentes a esta temática, sobre todo la pérdida de velocidad como indicador de la fatiga muscular (González-Badillo, 1991). La velocidad de ejecución depende de la magnitud de la carga levantada (% 1RM) y de la voluntariedad del sujeto para levantar la carga. Todos los ejercicios deberían realizarse siempre a la máxima velocidad (González-Badillo & Ribas, 2002) para conseguir una mejora en el rendimiento deportivo. En la actualidad existen pocos estudios que hayan comparado la respuesta mecánica y fisiológica en el desplazamiento de una misma carga a distintas velocidades de forma voluntaria (González Badillo et al., 2014). Estos estudios

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

demonstraron que realizar las repeticiones a la máxima velocidad posible en la fase concéntrica, genera un mayor gasto energético (Mazzetti et al., 2007), un mayor VO₂ máx (Broich et al., 2012), una mayor producción de lactato (González-Badillo et al., 2014), unos altos picos de fuerza y aceleración (Schilling et al., 2008) y un mayor reclutamiento (Grimby & Hannerz, 1977).

Sin embargo, otros autores como Westcott et al. (2001), indicaban que realizar las repeticiones voluntariamente de forma lenta, no aumenta la intensidad de la contracción muscular o la intensidad del entrenamiento. Por otro lado, las contracciones lentas aumentan el tiempo bajo tensión (Buitrago et al., 2012) pudiendo aumentar la fatiga muscular.

1.2.5.7. Tipos de resistencias: El avance de la tecnología en el mundo del entrenamiento ha evolucionado con celeridad en las últimas décadas, con el objetivo de facilitar a los preparadores y entrenadores las herramientas para conseguir una mejora en el rendimiento de los deportistas. A continuación vamos a exponer una clasificación de los medios de entrenamientos disponibles en la actualidad.

○ *Medios de acción gravitacional:* estos medios, dependen de la Ley de Gravitación en la que dos cuerpos se atraen entre ellos con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que les separa. Este tipo de resistencias, siguen una línea de acción vertical hacia abajo, y ésta, es proporcional a la masa (cantidad de materia) y depende de la aceleración debida a la atracción gravitacional terrestre. Estos medios son:

- *Autocargas:* El trabajo con autocarga tiene su origen en la calistenia o la tradicional gimnasia sueca, y se fundamenta principalmente en el trabajo con el peso corporal. Además, los ejercicios con el peso corporal son utilizados en la mayoría de los deportes siendo la base fundamental para posteriormente entrenar de manera más específica. Estos ejercicios podrían ser dominadas, sentadillas, fondos, planchas, etc.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- *Lastres*: Hacen referencia a un tipo de resistencia muy variable y versátil y suele utilizarse de manera combinada con las autocargas. Es muy importante que los lastres estén bien colocados, para que no pueda influir negativamente en la técnica y pueda por tanto generar lesiones y descompensaciones. Los lastres pueden ser muñequeras, tobilleras, chalecos con peso adicional, cinturones, etc.
- *Peso libre (Mancuernas, discos y barras)*: Este material tiene la particularidad que se pueden realizar ejercicios en los tres planos de movimientos sin ninguna restricción. Un aspecto fundamental en este tipo de trabajo, reside en la variación de los momentos de fuerza que se producen en el momento que se realiza el ejercicio.
- *Máquinas de carga fija (Poleas)*: Las poleas hacen referencia a una máquina simple destinada a modificar el sentido de una fuerza sin cambiar su intensidad. Además, permiten realizar una gran variedad de movimientos en relación al espacio y tiempo (Siff & Verhoshansky, 2000). Por tanto, con este tipo de máquinas, la carga no varía durante el movimiento, aunque la resistencia final sobre la musculatura, sí puede hacerlo debido a la angulación que adopte el cable con respecto al eje articular en cada ejercicio. En el mercado podemos encontrar diferentes tipos de poleas como poleas fijas, o móviles.
- *Máquinas de resistencia variable*: Hacen referencia a aquellas máquinas que utilizan un sistema para variar la resistencia a lo largo de todo el rango de movimiento (ROM), manteniendo constante la carga en todo momento. El objetivo principal, es proporcionar una curva de resistencia lo más similar posible a la curva de fuerza de un determinado movimiento, con el objetivo de que la musculatura implicada se contraiga al máximo de su capacidad durante todo el ROM (Tous, 1999).
- *Máquinas de palanca*: Hace referencia a un tipo de máquinas en las que dan como resultado movimientos convergentes o divergentes, aunque no logran imitar el movimiento de rotación que producen las articulaciones, perdiéndose el estímulo en

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

determinadas partes del recorrido (ROM). Presenta unas ventajas como que son ligeras, no precisan de mucho mantenimiento, facilidad en el uso con la aplicación de discos de peso, aunque se ha demostrado que genera una mayor activación en la acción concéntrica que en la excéntrica (Lacaba & Jiménez, 2001).

○ Medios de acción inerciales (No gravitacionales): Aunque nos centraremos en este apartado más adelante, mencionar que este tipo de máquinas, disponen de un mecanismo de funcionamiento bastante simple en el que a través de una cuerda que se desenrolla durante la fase concéntrica, se almacena energía cinética, para generarse posteriormente en la fase excéntrica, la cual tiene que frenar al deportista cambiando de nuevo la dirección del vector de fuerza (Berg & Tesch, 1998). Además, destacar que a mayor fuerza desarrollada durante la fase concéntrica, mayor fuerza se devuelve durante la fase excéntrica.

○ Medios isocinéticos: Hacen referencia a máquinas diseñadas para mantener la velocidad de desplazamiento constante, eliminando la aceleración. Además, se pueden modificar parámetros como el ROM, la carga o la velocidad por lo que se puede trabajar en condiciones específicas. Estas máquinas suelen tener un precio muy elevado además de llevar un software incorporado son muy utilizadas en el contexto de la investigación.

○ Medios neumáticos: Hacen referencia a aquellas máquinas donde la resistencia se da por compresión de un fluido, utilizando el aire comprimido en un pistón y aprovechar la presión que se produzca y transformarla en cargas de resistencia. Se elimina además la inercia al no desplazar ninguna masa, por lo que la velocidad en los movimientos pueden ser máximos.

○ Otros medios disponibles:

- *Electroestimulación (EMS)*: En el apartado siguiente, hablaremos más detenidamente de la EMS, pero lo mencionamos ahora. Esta metodología hace referencia a la aplicación de una corriente eléctrica, con el objetivo de provocar la contracción de las fibras musculares, siendo además el único que no dispone de una resistencia que el deportista tiene que vencer con la acción muscular. Se asume que es un complemento al

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

entrenamiento, puesto que la no combinación y por tanto su único uso, resulta perjudicial para capacidades físicas como salto vertical o carrera de velocidad (Herrero et al., 2006).

- *Estimulación vibratoria:* Hace referencia a un medio de entrenamiento en el cual se generan unas cargas acelerativas muy importantes, estimulando reflejos específicos en nuestro organismo. Esta metodología recibe el nombre de Estimulación Neuromuscular Mecánica (Whole Body Vibration) y a pesar de su elevado precio, su utilidad ha sido muy extendida a lo largo de los años.

1.3. ENTRENAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE LA FUERZA.

En la actualidad, debido a los avances tecnológicos, nos podemos encontrar numerosas y novedosas metodologías de entrenamientos asociadas a unas nuevas herramientas o dispositivos, que tienen como objetivo facilitar la accesibilidad y posibilidad de conseguir unas ganancias o resultados mejores que con los protocolos de los entrenamientos tradicionales o convencionales. En esta tesis, pondremos de manifiesto diferentes metodologías novedosas de entrenamiento y no convencionales con características muy distintas y que nos pueden ayudar a entender su utilidad y beneficios que son muy diferentes según se ha comprobado en la literatura científica en el ámbito del rendimiento deportivo. A continuación destacamos las siguientes:

1.3.1. Entrenamiento con máquinas isoinerciales:

El entrenamiento isoinercial, tiene su origen en la década de los ochenta ante la preocupación de los astronautas ante el deterioro de gran parte de su masa muscular y ósea así como de la fuerza en sus misiones en el espacio. La utilización de fármacos, o la estimulación eléctrica entre otras, fueron unas de las alternativas pero ninguna era tan efectiva como el ejercicio físico (Berg & Tesch, 1998). Fue la propia institución americana de la NASA, los que sacaron a concurso un proyecto en los que se pudiera solucionar esta problemática. Asimismo, el instituto Karoliska de Estocolmo (Suecia), con los investigadores Berg y Tesch, diseñaron un ergómetro que podía ofrecer una resistencia independientemente de la gravedad, mediante la

utilización de una rueda (polea isoinercial) basada en la tecnología inercial, en el que el deportista genera energía cinética durante la fase concéntrica, que será devuelta y frenada durante la fase excéntrica (Tous, 2010).

Fue en la década de los años noventa cuando se publicó un estudio en el que se validó el dispositivo de entrenamiento de fuerza con un sistema mecánico que funcionaba independientemente de la gravedad, y fundamentado en la resistencia inercial ejercida por unos discos de inercia que generaban una sobrecarga en la fase excéntrica del movimiento llamado Flywheel Exercise Device (Berg & Tesch, 1994), conocido también como tecnología o dispositivos isoinerciales y patentado como YoYo Inertial TechnologyTM.

En la actualidad, las máquinas isoinerciales se utilizan en muchos otros contextos, como en el entrenamiento con cargas, en salas de musculación, para la recuperación de lesiones músculo esqueléticas sobre todo en el entrenamiento con sobrecarga excéntrica, o incluso y debido a su facilidad de transporte, como medio de entrenamiento para deportistas profesionales durante sus competiciones. En este sentido, podemos diferenciar por un lado las máquinas de tecnología yoyo y por otro la polea cónica. La primera se fundamenta, en un volante de inercia, el cual se encuentra fijado a un eje adherido a una estructura. Así, la cincha o cinta de transmisión se enrolla por un lado en el eje del volante así como en el elemento externo ya sea un chaleco, una tobillera o una cuerda (Romero-Rodríguez et al., 2011). Con respecto a la polea cónica, se compone de un cono, el cual se encuentra unido en su parte inferior con una rueda de inercia, que dispone de varios contrapesos que se pueden añadir o retirar, los cuales van a determinar el momento de inercia. Así la cuerda se enrolla en el cono en ambos sentidos generando las dos acciones musculares concéntrica y excéntrica. Además tiene la particularidad de que se puede trabajar hacia los diferentes planos de movimiento (Romero-Rodríguez et al., 2011). Por tanto, la diferencia entre ambos dispositivos isoinerciales, es que con la tecnología yoyo se producen niveles de fuerza muy altos a velocidades intermedias y bajas, mientras que con la polea cónica se producen niveles de fuerza moderados y altos a velocidades altas, siendo

en definitiva, dos sistemas complementarios y no excluyentes.

Pero la mayor utilidad que se le da a este tipo de dispositivos es por la gran posibilidad de trabajar con sobrecargas excéntricas. Las contracciones excéntricas, hacen referencia a aquellas donde la musculatura se alarga, aumentando la distancia entre los discos Z del músculo (López-Calbet, 1998). Es utilizada cuando existe una resistencia mayor a la tensión realizada por los músculos, produciéndose una contracción a la vez que un alargamiento o elongación del músculo (Boeckh-Behrens & Buskies, 2004; de Hoyo et al., 2015a; de Hoyo et al., 2015c). Entre los efectos positivos del entrenamiento excéntrico, destacamos los siguientes:

Los autores Proske y Morgan (2001), indican que con el entrenamiento excéntrico, se llegan a prevenir posibles lesiones en deportistas durante situaciones de competición, además de personas sin adherencia al ejercicio con distrofias musculares, pese a estar excluido de los entrenamientos durante años, debido al proceso inflamatorio y daño muscular que genera (Willmore & Costill, 2004). Además, recupera los posibles procesos de tendinitis, regenerando los tejidos (Cannell et al., 2001) o roturas musculo-ligamentosas (Mjolsnes et al., 2004) por lo que resulta necesario asegurar un buen balance muscular, de manera que se respeten los principios de equilibrio arriba-abajo, derecha-izquierda y agonista antagonista (Casáis, 2008).

A niveles de desarrollo muscular, el entrenamiento excéntrico, genera unos mayores ganancias en hipertrofia en comparación con el trabajo tradicional con enfoques mas concéntricos e isométricos (Hortobagy et al., 2003).

Por todo ello, entre las características fundamentales del trabajo excéntrico, destacamos que genera mayor tensión que en el resto de acciones del movimiento (Johnson et al., 1976), produce un menor reclutamiento de las unidades motoras (Morgan & Allen, 1999), produce un menor gasto energético (Lastayo et al., 1999) y además el control neuromuscular que produce resulta muy diferente al del resto de acciones (Enoka, 1997).

Por otro lado, las contraindicaciones que propone este tipo de entrenamiento, es que está asociado con la aparición de DOMS, probable alteración del metabolismo oxidativo, microruptura muscular (Morgan & Allen, 1999), disminución de la tensión muscular (Allen, 2001), así como una alteración de la respuesta husos musculares (Whitehead et al., 2001).

Sin embargo, esta metodología de entrenamiento de fuerza con énfasis en la acción excéntrica, no está tan estudiada e investigada como la metodología del entrenamiento tradicional, aunque poco a poco se está produciendo un importante incremento de investigaciones, tanto en el contexto del rendimiento deportivo, prevención de lesiones, como base de la hipertrofia, fuerza y potencia en sujetos entrenados (Nuñez et al., 2018; Sabido et al., 2017) así como en personas desentrenadas (Onambele et al., 2008), siendo además utilizado para medir la fuerza muscular y la potencia desde el punto de vista del rendimiento deportivo (Askling et al., 2003).

En relación a las características específicas en este tipo de entrenamiento, podemos decir que las acciones musculares excéntricas, también denominadas trabajo negativo, se producen cuando el sentido del vector de la fuerza muscular generada es opuesto al del cambio de longitud del músculo, produciendo un incremento del ángulo de la articulación sobre la que actúa. De esta manera, en el músculo se produce un alargamiento al no vencer la resistencia externa. Estas acciones excéntricas, se producen en la mayoría de los gestos deportivos así como en los gestos que realizamos de manera cotidiana.

Resulta muy apoyada la idea de que las acciones excéntricas presentan características muy diferentes a las acciones concéntricas, por lo que les permite alcanzar mayores niveles de fuerza siempre y cuando la acción excéntrica del movimiento venga precedida de la acción concéntrica en un mínimo intervalo de tiempo (Dudley et al., 1991) debido al almacenamiento de energía procedente del componente elástico del músculo (Meylan et al., 2008). A continuación,

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

vamos a detallar las características en el entrenamiento excéntrico.

- Bajo gasto energético: Numerosos estudios a lo largo de los años, han demostrado que el entrenamiento con acciones excéntricas genera un menor coste energético que las acciones concéntricas. Así lo han demostrado numerosos estudios tanto en pruebas de resistencia (Abbott et al., 1952), como en pruebas de fuerza (Caruso et al., 2003). Una de las explicaciones, es porque en la contracción muscular, cuando en el ejercicio se termina la tracción al filamento grueso de actina, la desconexión de la cabeza de la miosina de los sitios activos de la actina, gasta ATP, de manera que esto se produzca en menor medida en las acciones excéntricas (García-López, 2008).

- Ausencia del funcionamiento nervioso: Un objeto de estudio durante muchos años, ha sido identificar el orden de activación de las fibras musculares según sea la naturaleza de los ejercicios. Tradicionalmente se había demostrado que en las acciones concéntricas, se dispone de un patrón específico en el reclutamiento de las unidades motoras como es el principio de Henneman, el cual establece que en primer lugar se produce una activación de las fibras tipo I u oxidativas, seguidas de las de tipo IIa u oxidativa-glucolíticas y en último lugar las fibras de tipo IIb o glucolíticas (Milner et al., 1973). Sin embargo, durante un tiempo se identificó que en las acciones excéntricas ocurría totalmente lo contrario e invirtiéndose el proceso de reclutamiento. Sin embargo, con el paso de los años y con el creciente interés por la metodología excéntrica, se ha demostrado que al igual que ocurre durante la acción concéntrica, en la acción excéntrica también se producen los principios de Henneman (Duchateau & Baurdy, 2013). Además, en las acciones excéntricas, se activa un menor número de unidades motoras (35-60% menor) que en las acciones concéntricas (Fang et al., 2001), debido a que el Sistema Nervioso no puede activarlas, debido a un mecanismo de inhibición cuyo objetivo es proteger los elementos contráctiles del músculo (Aagaard et al., 2000). Por tanto, con las acciones excéntricas de cualquier movimiento, pueden llegar a generar valores más elevados de fuerza con una menor activación muscular con respecto a las acciones concéntricas.

- Elevados picos de fuerza muscular: Han sido muchos los estudios que han comparado los

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

niveles de fuerza entre las acciones concéntricas y excéntricas, y en los que se ha demostrado que las acciones excéntricas generan mayores picos de fuerza (Colliander & Tesch, 1990; Hollander et al., 2007). La explicación que se le da a este resultado, hacen referencia al mayor reclutamiento de las fibras musculares que se da en este tipo de acciones y además retrasa la aparición de la fatiga muscular (Ratamess, 2012).

○ Daño y dolor muscular tardío: El entrenamiento con sobrecarga excéntrica, genera un daño en las estructuras músculo-tendinosas (Paulsen et al., 2010). Debido a que el reclutamiento de fibras musculares es menor que en las acciones concéntricas, y debiendo generar la mayor cantidad de fuerza, esto, podría ocasionar la ruptura de sarcómeros tanto en los filamentos de actina y miosina o incluso la ruptura de discos Z y por tanto provocando una respuesta inflamatoria tardía para reparar los daños.

La evolución de estos dispositivos, ha ido desarrollándose a lo largo de los años. Generalmente, el entrenamiento excéntrico resulta complejo de desarrollar, debido a que se precisan dispositivos muy concretos para focalizar mejor su trabajo. Esto es debido, a que con el entrenamiento convencional resulta difícil incidir en dichas fases de manera tan específica y óptima (Reeves et al., 2009). Para atender mejor a las fases excéntricas, se ha controlado la velocidad en cada una de las fases del movimiento (Marques et al., 2013), resistencias manuales de sujetos ayudantes (Fernández-Gonzalo et al., 2011) o incluso máquinas isocinéticas (Collinder & Tesch, 1990). Con el paso de los años, la investigación en el campo del rendimiento asociada a la innovación tecnológica, ha provocado la creación de nuevos dispositivos muy interesantes en los que se focaliza de manera directa la sobrecarga excéntrica como el Flywheel Exercise Device, (Berg & Tesch, 1994), cicloergómetros excéntricos (Lastayo et al., 1999), Bromsman® eccentric overload training device (Frohm et al., 2005), Inertial Exercise Trainer®, Polea cónica (Versapulley®) o YoYo™ entre otros. En todos ellos, la resistencia a vencer esta reflejada por el momento de inercia de los volantes utilizados, los cuales dependen de su radio y de su masa.

Lundberg et al. (2019), en su estudio compararon los efectos de hipertrofia que se producen en la musculatura del cuádriceps, entre dos medios de entrenamiento como son el entrenamiento con cargas tradicional y el entrenamiento isoinercial (flywheel) durante 8 semanas de entrenamiento (2 veces por semana), tanto en hombres como en mujeres (N = 16 sujetos). El entrenamiento consistió en la realización del protocolo de entrenamiento tradicional en una pierna (4x8-12 repeticiones) y en la otra el entrenamiento isoinercial (4x7 repeticiones). Los resultados de este estudio, indicaron que pese a que en ambos medios mostraron un aumento de la hipertrofia, no se encontraron diferencias en ninguno de los extensores de rodilla (cuádriceps) entre ambos protocolos de entrenamiento. Sin embargo, en el entrenamiento isoinercial, los hombres mejoraron el 1 RM con respecto a las mujeres.

Walker et al. (2016), realizaron un estudio en el que compararon dos protocolos de entrenamiento durante 10 semanas, entre un entrenamiento con una carga excéntrica acentuada (40% mayor que la carga concéntrica) con otro entrenamiento donde la carga concéntrica y excéntrica es igual en sujetos entrenados. Ambos protocolos de entrenamiento, realizaron 3 series de 6RM (primera sesión) y 3 series de 10RM (segunda sesión) de entrenamiento en los ejercicios de empuje de piernas (leg press) y extensión de rodilla unilateral (unilateral leg extension). El objetivo de este estudio, fue analizar la fuerza máxima concéntrica y excéntrica así como la isométrica unilateral en el ejercicio de extensión de piernas. Los resultados de este estudio nos indicaron que tras la realización de los protocolos de entrenamiento, la fuerza máxima isométrica aumentó significativamente más en el grupo con incidencia excéntrica al igual que la fuerza máxima excéntrica, pero no en la fuerza máxima concéntrica. Respecto a la masa muscular, en ambos protocolos de entrenamiento, se produjeron aumentos en la masa muscular (hipertrofia).

Owerkowicz et al. (2016), realizaron un estudio durante 5 semanas en que se pretendía ver los efectos producidos tanto a nivel de fuerza como de resistencia, así como fisiológicos por medio de la utilización de un dispositivo de múltiples ejercicios para trabajar y simular situaciones de antigraedad (Multi-Mode Exercise Device (YoYo™ Technology). El protocolo de entrenamiento en dicho dispositivo, consistió en un entrenamiento de fuerza de 4 series de 7

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

repeticiones de sentadillas (2 veces por semana) y un entrenamiento aeróbico que consistió en 4 series de 4 minutos de remo al 90%Vo2máx (3 días en semana). Los resultados de este estudio, nos indicaron que se produjeron cambios importantes a nivel fisiológico, además de a nivel músculo esquelético como cardiovascular, por lo que la utilización de este tipo de ejercicios, resulta muy interesante para conseguir adaptaciones en misiones espaciales.

De Keijzer et al. (2020), realizaron un estudio a jugadores universitario de fútbol en el que desarrollaron tres protocolos de trabajo excéntrico, en el que el objetivo fue analizar con qué volumen de entrenamiento (diferente número de series) se conseguían mejores resultados en relación a la capacidad de salto (CMJ y LJ). Estos tres protocolos, fueron la realización de 1 serie, 2 series o 3 series de 6 repeticiones de media sentadilla (Half squats) con un disco de inercia de 0.029 kg·m² (flywheel ergometer). Respecto a las mediciones en los saltos, se realizaron tras los 3 y 6 minutos para determinar en qué momento se conseguían mejores valores en la capacidad de salto. Los resultados de este estudio indicaron que en ambos saltos (CMJ y LJ) se consiguieron mejores resultados tras la realización de los protocolos de dos y tres series, pero no tras el protocolo de una única serie. De igual modo, estos resultaron fueron más elevados tras la medición de los saltos a los 6 minutos y no a los 3.

Coratella et al. (2019), realizaron un estudio en jugadores de fútbol durante 8 semanas en el que comparaban los efectos en cambios de dirección (test de agilidad y 20+20 metros lanzados (shuttle), carreras de velocidad (10-30 metros sprint), capacidad de salto (SJ y CMJ), masa muscular y fuerza en cuádriceps e isquiotibiales, en dos protocolos diferentes de entrenamiento de sentadillas (48 repeticiones) como son el entrenamiento isoinercial con un disco de inercia de 0.11 kg·m² (flywheel device) y el entrenamiento con cargas tradicional (80% 1RM). Los resultados de este estudio indicaron que los tiempos obtenidos en las pruebas en el test de agilidad y en 20+20 metros lanzados (shuttle), disminuyeron en el entrenamiento isoinercial a diferencia del entrenamiento tradicional. Con respecto a los saltos, se produjeron mejoras en ambos protocolos de entrenamiento, al igual que la fuerza muscular en cuádriceps e isquiotibiales, así como en la masa muscular.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Cuenca Fernández et al. (2015), realizaron un estudio en nadadores en el que comparaban dos protocolos de post-activación potenciación (PAP), consistentes en 3 zancadas al 85% 1 RM y el otro de cuatro repeticiones en una plataforma YoYo Squat, con el objetivo de analizar el rendimiento en la ejecución tras 8 minutos de nado. Los resultados de este estudio, indicaron que ambos protocolos, mejoraron la velocidad horizontal de los nadadores. Sin embargo, se obtuvieron mejores resultados en los nadadores que realizaron el entrenamiento isoinercial con respecto al entrenamiento tradicional, sobre todo en eventos de distancias cortas.

de Hoyo et al. (2015a), realizaron un estudio en el cual analizaban los efectos producidos en los parámetros cinemáticos de los cambios de dirección, saltos verticales (CMJ) y carrera de velocidad de 20 metros (Sprint) en futbolistas profesionales tras la aplicación de dos protocolos diferentes de calentamiento, como son por un lado el calentamiento de 5 minutos en bicicleta estática y por otro lado, los 5 minutos en bicicleta complementada con el ejercicio de media sentadilla en YoYo Squat. Los resultados de este estudio, indicaron que la aplicación del trabajo isoinercial durante el calentamiento, produce una mayor activación tanto en los cambios de dirección, como en los saltos verticales y las carreras cortas de velocidad.

de Hoyo et al. (2015b), realizaron un estudio comparativo entre el entrenamiento con cargas tradicional (multipower) y el entrenamiento excéntrico (Inertial Flywheel Device) en media sentadilla (half squat), con el objetivo de analizar distintas variables como velocidad en 10 y 20 metros, altura en CMJ, cambios de dirección en 20 metros y fuerza máxima isométrica. El protocolo de entrenamiento, fue similar en ambos métodos siendo éste, un entrenamiento de potencia basado entre 5 y 8 series de 8 repeticiones durante 6 semanas. Los resultados de este estudio, afirmaron que con el entrenamiento tradicional se consiguieron mejores resultados en la altura de CMJ, así como en la carrera de velocidad de 20 metros con respecto al entrenamiento isoinercial. Sin embargo ambos protocolos de entrenamiento, consiguieron mejoras en el rendimiento de la carrera de velocidad de 10 metros.

Douglas et al. (2018), realizaron un estudio a jugadores de rugby en el que comparaban diferentes metodologías de entrenamiento como son el entrenamiento con cargas tradicional y el

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

entrenamiento isoinercial, variando además sus protocolos como el tiempo utilizado en la fase excéntrica del movimiento, con el objetivo de analizar variables como el 1RM en sentadillas, pico de potencia isoinercial, fuerza reactiva en drop jump, 40 metros velocidad, máxima velocidad en carrera y arquitectura del vasto media para poder compararlas antes y después en cada medio de entrenamiento. Los resultados de este estudio, indicaron que con el entrenamiento isoinercial con un tiempo lento en la acción excéntrica (2 segundos), se consiguieron mejoras en el 1RM en sentadillas, 40 metros velocidad y la máxima velocidad en carrera. Sin embargo con el entrenamiento isoinercial con un tiempo rápido (1 segundo), se generó una pequeña mejora en la fuerza reactiva en drop jump en comparación con el entrenamiento tradicional. Por tanto, la incorporación del entrenamiento isoinercial con incidencia lenta en la fase excéntrica del movimiento, resulta muy interesante para la mejora de ciertas capacidades que deben tener los jugadores de rugby, por lo que resulta muy interesante este tipo de protocolos de entrenamiento.

Illera Domínguez et al. (2018), realizaron un estudio a jóvenes entrenados durante 4 semanas con 10 entrenamientos (2-3 por semana), en el cual pretendían analizar los efectos y adaptaciones (antes, después de 2 y 4 semanas) y como el volumen del músculo (hipertrofia), así como las funciones de los flexores y extensores de rodillas (fuerza concéntrica, excéntrica e isométrica máxima), tras un protocolo de entrenamiento basado en el sistema de entrenamiento isoinercial en sentadillas. Los resultados de este estudio, indicaron que después de las semanas 2 y 4, se produjo incrementos en la hipertrofia del cuádriceps. Asimismo, aumentaron los niveles de fuerza y potencia en las acciones concéntrica y excéntrica. Por otro lado, la fuerza máxima isométrica de los extensores de rodilla (cuádriceps), aumentó significativamente a diferencia de los flexores de rodilla (isquiotibiales).

Petré et al. (2018), realizaron un meta-análisis con el objetivo de analizar los efectos del entrenamiento isoinercial en la volumen muscular (sección transversal del músculo), potencia, fuerza dinámica máxima, desarrollo de potencia y el desarrollo del movimiento horizontal y vertical. Los resultados de esta revisión sistemática, indicaron que el entrenamiento isoinercial, durante un periodo de entre 4 y 24 semanas, mostró aumentos significativos en todas las variables de la fuerza, así como en la hipertrofia (sección transversal del músculo), por lo que

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

resulta muy recomendable el uso del entrenamiento isoinercial en jóvenes entrenados en aquellos deportes en los que sea recomendable mejorar esas capacidades.

Gonzalo Skok et al. (2017), realizaron un estudio durante 8 semanas (2 veces por semana) para comprobar los efectos en el rendimiento de los deportistas, en base a dos protocolos de entrenamientos diferentes con una polea cónica isoinercial, consistentes por un lado en un ejercicio bilateral como es la sentadilla (1 ejercicio con 6 series de 6-10 repeticiones) y por otro lado, movimientos unilaterales en todas direcciones (6 ejercicios con 1 serie de 6-10 repeticiones). Los resultados de este estudio, indicaron que en ambos protocolos de entrenamiento se produjeron mejoras en todas las pruebas (test de cambio de dirección, test de carrera de 25 metros, test de saltos unilaterales y test de saltos bilaterales).

Howarth et al. (2019), realizaron un estudio durante 8 semanas (2-3 veces por semana) en jugadores de hockey hielo en el que comparaban los efectos en relación a la fuerza (1RM Sentadilla), potencia (Sentadillas con salto y carreras en sprint), composición corporal y volumen muscular (hipertrofia) producidos entre dos protocolos como son el entrenamiento con cargas tradicional y el entrenamiento isocinético lento con incidencia en la acción excéntrica. Los resultados de este estudio, indicaron que en ambos protocolos se produjeron incrementos similares en relación al valor de 1RM (fuerza), sentadillas saltos (potencia) y composición corporal. Sin embargo, sólo con el entrenamiento isocinético con incidencia excéntrica se aumentó el volumen muscular (hipertrofia) en los vastos mediales y rectos femorales.

Kowalchuk y Butcher (2019), realizaron una revisión sistemática en relación a los beneficios que puede producir el entrenamiento isoinercial en personas ancianas con respecto al mantenimiento de la fuerza y la potencia muscular. Los resultados de esta revisión, indicaron que el entrenamiento isoinercial en personas ancianas, puede ayudar a mantener las adaptaciones producidas en el sistema neuromuscular, gracias a la incidencia excéntrica de este tipo de dispositivos, que no es posible con el entrenamiento con cargas tradicional.

Toien et al. (2018), realizaron un estudio a sujetos no entrenados (53 sujetos) durante 8

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

semanas (3 veces por semana), en el que comparaban los efectos y las adaptaciones producidas en dos protocolos diferentes de entrenamientos, consistentes por un lado en un entrenamiento de fuerza (prensa de piernas) de 4 series de 9 repeticiones (90% 1RM) con la misma carga concéntrica y excéntrica y por otro lado, el mismo ejercicio pero con una incidencia en fase excéntrica del movimiento de prensa del 150% 1RM. Los resultados de este estudio, indicaron que en ambos protocolos de entrenamiento, se mejoraron los niveles de fuerza de 1RM y de salto (CMJ). Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas entre ambos protocolos, pero sí fueron respecto al grupo control que no realizó dicho entrenamiento.

Suárez-Arrones et al. (2018), realizaron un estudio longitudinal en futbolistas jóvenes a lo largo de una temporada completa (27 semanas), en el que tenían como objetivo analizar y ver los efectos y adaptaciones producidas a nivel de composición corporal, fuerza muscular (media sentadilla) y carrera en velocidad (40 metros de carrera de velocidad), tras la aplicación de dos sesiones semanales de un protocolo de entrenamiento isoinercial, consistente en 1-2 series de 10 ejercicios en la musculatura del tren superior y abdominal (día 1), y tren inferior (día 2). Los resultados de este estudio, indicaron que en relación a la composición corporal, la masa grasa disminuyó, mientras que la masa muscular aumentó. Por otro lado, tanto la fuerza muscular como la velocidad en 40 metros, también aumentaron, por lo que se deduce que un programa combinado entre el trabajo isoinercial y el entrenamiento el fútbol, genera importantes mejoras tanto en la composición corporal como en las capacidades de rendimiento.

Fiorilli et al. (2020), realizaron un estudio de 6 semanas (2 sesiones por semana) en futbolistas jóvenes comparando 2 métodos de entrenamiento como son por un lado, el entrenamiento pliométrico y por otro el entrenamiento isoinercial, con el objetivo de analizar cómo eran los efectos y las adaptaciones en fuerza explosiva y reactiva, carrera en velocidad, cambios de dirección, agilidad y precisión en el tiro. Los resultados de este estudio, indicaron que con el entrenamiento isoinercial, se consiguieron valores significativamente más elevados en la altura de los saltos (SJ y DJ), test de agilidad y precisión en el tiro por lo que estos resultados confirman los efectos positivos en la utilización de dispositivos isoinerciales para la mejora de su rendimiento.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Maroto-izquierdo et al. (2017a), realizaron un estudio de 6 semanas (15 sesiones) en jugadores de balonmano en el que comparaban diferentes protocolos de entrenamiento como son el entrenamiento isoinercial (prensa de piernas isoinercial) y el entrenamiento tradicional (prensa de piernas en máquina), con el objetivo de analizar los efectos y adaptaciones producidos por éstos en el valor de la fuerza (1RM), potencia muscular, CMJ, SJ, carrera de velocidad en 20 metros, t-test, y volumen o grosor de los vastos laterales. Los resultados de este estudio, indicaron que con el entrenamiento isoinercial, se obtuvieron superiores mejoras en relación a la potencia, CMJ, carrera de velocidad en 20 metros, t-test y volumen muscular en los vastos laterales en comparación con el grupo que realizó entrenamiento tradicional. Asimismo, el grupo de entrenamiento isoinercial, consiguió mejoras significativas en fuerza (1RM), CMJ, SJ, carrera de velocidad de 20 metros, t-test y volumen en los vastos laterales, por lo que resulta muy interesante la utilización del entrenamiento isoinercial como complemento a la preparación física en aquellos deportes en los que se requieran este tipo de capacidades de rendimiento.

Asimismo, Maroto-Izquierdo et al. (2017b), realizaron un meta análisis en atletas sanos en el que comparaban las diferencias en relación a los efectos y adaptaciones existentes en el volumen muscular y capacidades funcionales (fuerza y potencia), entre el entrenamiento tradicional y el entrenamiento isoinercial con incidencia excéntrica. Los resultados de esta revisión, indicaron que el entrenamiento isoinercial con incidencia en la fase excéntrica, provocó mayores adaptaciones en cuanto al volumen muscular y en las capacidades de fuerza y potencia con respecto al entrenamiento tradicional.

Annibalini et al. (2019), realizaron un estudio en hombres entrenados con el objetivo de analizar los efectos y las adaptaciones en el sistema muscular y molecular producidos por una única sesión de entrenamiento con un dispositivo isoinercial (5 series de 10 repeticiones máximas en sentadillas). Los resultados de este estudio, indicaron que con sólo una sesión isoinercial, se modifican los marcadores a nivel estructural y funcional.

Núñez et al. (2018), realizaron un estudio en jóvenes deportistas durante 6 semanas con el

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

objetivo de comparar los efectos y adaptaciones crónicas producidas referentes al volumen muscular (hipertrofia) así como en otras capacidades de rendimiento como la fuerza y potencia muscular, velocidad o agilidad entre otras, comparando diferentes protocolos de entrenamientos, como un ejercicio unilateral (zancada lateral) y otro bilateral (media sentadilla), ambos utilizando un dispositivo isoinercial. Los resultados de este estudio, indicaron que el grupo que realizó un trabajo unilateral, obtuvo incrementos mayores en volumen muscular en el aductor mayor y vasto medial con respecto al grupo de trabajo bilateral. Sin embargo, el trabajo bilateral, mostró mayores incrementos en los vastos laterales y gastronemios con respecto al grupo de trabajo unilateral. En relación a las capacidades de rendimiento, ambos protocolos de entrenamiento, aumentaron los efectos en fuerza, potencia, velocidad y agilidad, por lo que el trabajo con una metodología isoinercial, resulta muy interesante de incorporarla en programas de preparación física con el objetivo de mejorar el rendimiento de los deportistas.

Núñez et al. (2017), realizaron un estudio en jugadores de rugby comparando dos protocolos de entrenamientos como son el entrenamiento isoinercial y el entrenamiento tradicional en el ejercicio ‘‘High Pull’’, con el objetivo de analizar los efectos y adaptaciones producidas en relación a la fuerza, velocidad y aceleración de la barra así como la concentración en lactato en sangre. Ambos protocolos, realizaron 6 series de 6 repeticiones con 20 segundos de recuperación. Los resultados de este estudio indicaron que el protocolo de entrenamiento isoinercial obtuvo mayores resultados en todas las variables analizadas con respecto al entrenamiento tradicional, excepto en la fuerza máxima concéntrica, que fue mayor en el entrenamiento tradicional. Por tanto, el entrenamiento isoinercial, resulta ser muy interesante para la mejora de las capacidades de rendimiento en deportistas.

Beato et al. (2019), realizaron un estudio en atletas, en el que comparaban diferentes protocolos de entrenamiento como el entrenamiento isoinercial y el entrenamiento tradicional. En ambos protocolos, se realizó el mismo ejercicio (media sentadilla) con 3 series de 6 repeticiones y con el objetivo de analizar los efectos y adaptaciones producidas por éstos en salto de longitud, CMJ y carrera de velocidad en 5 metros. Todas estas pruebas, se midieron en los minutos 1, 5, 7 posteriores al experimento para ver cómo eran estos efectos. Los resultados de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

este estudio, indicaron que ambos protocolos mostraron diferencias en todas las variables y en todos los tiempos posteriores excepto después del minuto 5. Por tanto, ambos métodos de entrenamiento resultan interesantes para una mejora de rendimiento en los deportistas.

1.3.2. Entrenamiento con Electroestimulación (EMS).

La electroestimulación neuromuscular (EMS), se consideraba inicialmente como una herramienta de la rama de la Fisioterapia cuya utilidad era la de rehabilitación o recuperación de lesiones a pacientes con alguna lesión e incapaz de realizar una contracción muscular voluntaria por sí mismo. Asimismo, la EMS se define como la aplicación de un estímulo eléctrico a un músculo o grupo de músculos con el objetivo de conseguir una contracción muscular involuntaria.

Su origen y aproximación al ejercicio físico, se remonta a la publicación del libro de Galvani, “Comentarios sobre la electricidad en los músculos” en el año 1786, pero fue entre los años sesenta y setenta en la academia de ciencias del ejercicio de Moscú con el profesor ruso Kots (Kots & Chwilon, 1974), cuando empezó a utilizar la EMS de manera complementaria en sus deportistas de alto rendimiento, con el objetivo de aumentar sus niveles de fuerza muscular entre un 30 y un 40% (Benito et al., 2010). Posteriormente, han aparecido numerosos autores que han seguido la misma línea de investigación de Kots, analizando los niveles de fuerza, potencia y velocidad (Babault et al., 2007; Boschetti, 2002; Maffiuletti et al., 2002; Malatesta et al., 2003).

Posteriormente con el paso de los años, la EMS, fue cobrando más importancia aunque en los primeros años, resultó muy complicado de aplicar. Incluso algunos investigadores lo calificaron como un método imposible de aplicar debido a sus altos voltajes y a la imposibilidad de realizar contracciones tetánicas (McDonell, 1979). Años más tarde, con los avances tecnológicos, la EMS se ha convertido en un complemento muy útil en los diferentes programas de entrenamiento, apareciendo distintas marcas comerciales que ofrecen diferentes tipologías de

electroestimuladores con diferentes rangos de parámetros (Pombo et al., 2004).

Una de las dificultades más planteadas por los investigadores, es la gran variedad de posibilidades en relación a la modificación de los parámetros, tales como frecuencia, ancho del impulso, nivel de intensidad y tiempo de recuperación. Además, resulta muy frecuente la no especificación en el orden de aplicación de la EMS en relación al entrenamiento voluntario. A continuación, pasamos a detallar los diferentes parámetros que debemos tener en cuenta en el trabajo con EMS.

- Frecuencia: Hace referencia al número de veces que se repite una onda eléctrica en un segundo y se mide en Hercios (Hz). Todas las corrientes cuya frecuencia sea inferior a 40 Hz, serán consideradas como corrientes de baja frecuencia y su finalidad está basada en la recuperación, capitalización o incluso la oxigenación del músculo. Sin embargo, las corrientes superiores a 40 Hz, se considerarán como corrientes de alta frecuencia y cuya finalidad es aumentar los niveles de fuerza (Herrero et al., 2006).

- Ancho del impulso: Hace referencia a la altura que dispone la onda en su parte positiva. Según la ley de Lapique, el ancho del impulso de la corriente aplicada, debe ser al menos igual a la cronaxia muscular para producir una contracción muscular apreciable (Boscheti, 2002). La relación existente entre la amplitud de la corriente y la duración, determinará si el impulso es efectivo o no, de manera que si la fase es reducida, se deberá aumentar la amplitud para provocar el estímulo apropiado (Maya & Albornoz, 2010).

- Nivel de intensidad: Hace referencia a la cantidad de corriente que pasa por un conductor, la cual está definida por la densidad de corriente admisible y por la dimensión de los electrodos. Su unidad es el amperio. Se establecen cuatro umbrales de intensidad que son el sensitivo (percepción sensible de la corriente), motor (percepción visual de la contracción muscular), dolor (sensación o estímulo desagradable) y máximo dolor (máximo estímulo que un sujeto puede

soportar) (Alon & Smith, 2005).

Por otro lado, la EMS, ofrece una interesante alternativa al entrenamiento tradicional para mejorar los niveles de fuerza muscular, así como la economía en el tiempo de entrenamiento, sobre todo cuando se utiliza la EMS de cuerpo entero. Es por ello, por lo que la EMS, acorta el tiempo de trabajo en el entrenamiento de la fuerza, disminuyendo el número de sesiones por semana.

Es por ello, por lo que las ciencias del ejercicio han perseguido el objetivo de aumentar el rendimiento de los deportistas, y gracias al avance de las nuevas metodologías y medios de entrenamiento, se han superado las marcas año tras año. Es por ello, por lo que la EMS, ha sido otra de las innovaciones en el mundo del rendimiento deportivo, muy utilizada por los deportistas tanto en programas de fortalecimiento como de recuperación, ya sea del propio entrenamiento o de la competición. Sin embargo, como en otras técnicas, también presenta algunos inconvenientes como la inhibición del reflejo miotático y de la función del órgano tendinoso de Golgi, así como la incapacidad de en relación a la coordinación muscular agonista y antagonista.

El objetivo principal que busca conseguir la EMS, es aplicar una corriente eléctrica en el propio músculo para conseguir una contracción muscular involuntaria (Lake, 1992). Gracias a sus beneficios, numerosos deportistas de pruebas de resistencia, utilizan la EMS como sustitución del entrenamiento con cargas y con ello potenciar y desarrollar aquellos grupos musculares y eslabones débiles que con su propio deporte no es posible desarrollarlo (Pombo, 2004). También este remplazo, conserva mejor el cartílago articular al no levantar cargas pesadas que pongan en riesgo estas estructuras (Maffiuletti, 2009).

El autor Lanzani (2000), indicaba que la EMS tiene sentido siempre y cuando se

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

complementa con otras técnicas de entrenamiento para mejorar el gesto motor y solicitar todas las cualidades físicas, sean de tipo condicional o coordinativo. Además, las adaptaciones conseguidas fisiológicas en el entrenamiento combinado, resultan mayores que el entrenamiento con metodologías por separado (Vanderthommen & Crielaard, 2001).

En esta misma línea, son numerosos autores los que recomiendan la combinación de entrenamiento voluntario con el entrenamiento con EMS, ya que se obtienen numerosos beneficios (Benito et al., 2010; Herrero et al., 2006). Por un lado, esta combinación, permite un mayor reclutamiento de las fibras musculares (Paillard et al., 2010), aprovechamiento del tiempo de entrenamiento reclutando tanto las fibras rápidas como las lentas y no debiendo entrenar ambos métodos por separado (Ward & Shkuratova, 2002), o incluso que con esta combinación se conseguía una mejor coordinación agonista-antagonista de los músculos implicados. Además, la combinación de ambos métodos, obtiene mejoras en la fuerza de contracción voluntaria máxima (Ruiz et al., 2007), mejoras en el salto vertical y la fuerza muscular (Willoughby & Simpson, 1998).

Autores como Maffiuletti et al. (2002), comprobaron en su estudio que la aplicación de la EMS en los miembros inferiores, aumentaba la fuerza isométrica máxima y la altura del salto en un 0.20% en jugadores profesionales de voleibol. Sin embargo, en la actualidad existen numerosos artículos referente a esta temática que difieren en la variedad de parámetros, técnicas, número de electrodos, grupos musculares, intensidades, frecuencias, etc. por lo que resulta bastante complejo realizar comparativas fiables para determinar los grandes beneficios o inconvenientes de esta metodología de entrenamiento.

Delitto et al. (1989), afirmaban que con la EMS, se aumentaban los niveles de fuerza máxima dinámica en los levantadores de peso profesionales.

Con el paso de los años, la EMS ha ido avanzando en su utilización desde un enfoque local a uno más global como es la EMS de cuerpo entero, en el que se estimulan eléctricamente la musculatura a nivel general, activando la musculatura agonista y la musculatura antagonista al

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

mismo tiempo. Actualmente la EMS de cuerpo entero, se utiliza en todos los ámbitos y niveles de la sociedad, no siendo necesario ser un deportista de élite.

Las investigaciones en el campo del ejercicio físico, han relacionado la EMS con la fuerza muscular (Bax et al., 2005; Paillard, 2008; Sánchez et al., 2005) y el sistema neuromuscular (Vanderthommen et al., 2002). Sin embargo Sánchez et al. (2005), indicaron que los aumentos en los niveles de fuerza generados por la EMS, son similares a los obtenidos por la contracción voluntaria. Por todo esto, según Paillard (2008), la combinación de la EMS con el trabajo voluntario hace referencia a la metodología más óptima para conseguir el mejor resultado.

Hwang et al. (2020), realizaron un estudio en el que compararon el entrenamiento EMS y la acción voluntaria de manera conjunta y por otro lado la EMS de manera independiente y aislada en la musculatura abdominal y lumbopélvica, con el objetivo de analizar los efectos que producen ambos métodos de entrenamiento. Los resultados de este estudio, nos indican que el entrenamiento que combina la EMS con la acción muscular voluntaria, genera un mayor control lumbopélvico que la EMS de manera independiente.

Babault et al. (2007), realizaron una comparativa entre un programa de entrenamiento con EMS y otro sin EMS a jugadores profesionales de rugby durante 12 semanas, en una prueba isocinética en extensión de piernas. Los efectos fueron evaluados a través de sentadilla profunda, altura del salto vertical y carrera en sprint. Los resultados obtenidos en este estudio, indican que aunque en ambos protocolos de entrenamiento se consiguieron mejoras en cada una de las pruebas, no se encontraron diferencias significativas entre ambos protocolos con o sin EMS.

Weissenfels et al. (2019), realizaron un estudio en el que comparan los efectos que producen el entrenamiento EMS de cuerpo entero y los ejercicios de fortalecimiento específicos para aliviar el dolor crónico de espalda durante 12 semanas de entrenamiento y una vez por semana. Los resultados de este estudio, indicaron que ambos métodos resultaron efectivos para aliviar los dolores de espalda y reducir la lumbalgia, de manera que la EMS puede ser una

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

herramienta efectiva para aquellas personas que no disponen de tiempo para realizar ejercicio voluntario.

Deley et al. (2011), realizaron un estudio en el que compararon un grupo que realizó un entrenamiento combinado entre EMS y gimnasia deportiva, y otro grupo que solo realizó dicho deporte sin EMS. El estudio duró unas 6 semanas, y analizaron la capacidad de los saltos (CMJ, SJ, test de reactividad y 3 saltos específicos de gimnasia deportiva). Los resultados de este estudio, nos indican que el entrenamiento combinado entre EMS y la gimnasia deportiva en este caso, mostraron aumentos significativos en valores de fuerza y de saltos.

Wirtz et al. (2015), realizaron un estudio comparativo entre el entrenamiento combinado de EMS y acción voluntaria, con el entrenamiento sin EMS con el objetivo de analizar las respuestas metabólicas y hormonales entre ambos grupo en deportistas entrenados durante 6 semanas de entrenamiento. Los resultados nos indican que a nivel hormonal, no se encontraron diferencias significativas, pero sí a nivel metabólico.

Micke et al. (2018), realizaron un estudio comparativo entre el entrenamiento combinado con EMS y sin EMS con el objetivo de analizar parámetros de fuerza y potencia en estudiantes deportistas durante 8 semanas (2 veces a la semana) en diferentes ejercicios del tren inferior (leg curl, leg extensión y leg press). Los resultados de este estudio indicaron que ambas metodologías como son la combinación del entrenamiento voluntario con EMS y sin EMS, se mostraron efectivas para la mejora de la fuerza y la potencia. Sin embargo, sólo en la máquina de extensión de piernas (leg extensión) se mostraron diferencias significativas a favor del entrenamiento voluntario con EMS con respecto a sin EMS.

Malatesta et al. (2003), realizaron un estudio en el que pretendían observar los cambios producidos en el salto vertical (SJ y CMJ) tras la aplicación de un programa de entrenamiento de 4 semanas (3 veces por semana), basado en la combinación de EMS con el trabajo voluntario de extensión de rodillas (Leg extensión) y flexores plantares. Los resultados de este estudio, indicaron que pasados 10 días posteriores a la intervención la altura en ambos saltos (SJ y CMJ)

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

aumentaron significativamente por lo que recomiendan la combinación de EMS y trabajo voluntario para la mejora del salto vertical.

Wirtz et al. (2019), realizaron un meta análisis de 5 recientes estudios en los que se compararan el entrenamiento combinado voluntario con EMS de cuerpo entero con el entrenamiento de fuerza sin EMS en deportistas entrenados, con el objetivo de analizar la fuerza y potencia de las piernas con los efectos producidos en los saltos verticales y en carreras en sprint. Ambos protocolos siguieron las mismas condiciones en cuanto a la carga. Los resultados de este meta análisis, nos indican que la combinación de EMS con el trabajo voluntario resulta como un complemento excelente para la mejora del rendimiento. Sin embargo, los efectos producidos en relación a la fuerza y a la potencia parecen ser limitados.

Herrero et al. (2006), realizaron una comparativa en diferentes protocolos de entrenamiento como son la EMS aislada, entrenamiento pliométrico, un entrenamiento combinado con los dos anteriores (pliometría y EMS), así como un grupo control, durante 4 semanas, con el objetivo de analizar los efectos producidos en carrera en sprint de 20 metros, capacidad de salto (SJ y CMJ), fuerza máxima isométrica y sección transversal del músculo. Los resultados obtenidos en este estudio, nos indican que con el entrenamiento EMS aislado, se mejoraron todas las variables analizadas excepto las de capacidad de salto (SJ y CMJ). Sin embargo, la combinación de ambos protocolos de entrenamiento (EMS y pliometría), consiguieron unos resultados mucho más completos en sus variables incluyendo además las de salto vertical (SJ y CMJ).

Brocherie et al. (2005), realizaron un estudio comparativo entre la utilización o no de la EMS en jugadores profesionales de Hockey hielo. Su estudio se basó en la aplicación de EMS local en los extensores de rodilla combinándolo con el ejercicio de extensión de piernas en la máquina isocinética, con el objetivo de comparar los efectos de la EMS en relación con la fuerza concéntrica y excéntrica del cuádriceps, prueba de 10-30 metros específica de skating, así como en saltos verticales (SJ, CMJ, DJ y 15 CMJ). Los resultados de este estudio, indicaron que tras un protocolo de 3 semanas de aplicación de EMS, se aumentaba significativamente la fuerza

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

excéntrica del movimiento (extensión de piernas), los 10 metros de carrera en sprint. Sin embargo, disminuían significativamente los saltos verticales.

Sañudo et al. (2020), realizaron un estudio en el que se analizaban como era el impacto en la recuperación activa a través de la utilización de la EMS de cuerpo entero, y comparándolo con aquellos que no la utilizaron. Las variables a medir fueron la frecuencia cardíaca, el flujo sanguíneo, la concentración de lactato en sangre y el dolor muscular en sujetos sanos. Los resultados obtenidos en este estudio, indicaron que tras la aplicación de un protocolo de entrenamiento de intensidad máxima, la recuperación activa que realizaron el grupo que utilizaba la EMS de cuerpo entero, generó una mayor velocidad en el flujo sanguíneo por lo que generó una mayor recuperación, así como un menor dolor post entrenamiento con respecto al grupo que no utilizó la EMS.

Benito-Martínez et al. (2011), realizaron un estudio en el cual comparaban distintos protocolos de entrenamiento (EMS y pliometría), así como distintos órdenes en la aplicación de los mismos, con el objetivo de analizar el rendimiento tanto en el salto vertical (Test abalakov) como en test de velocidad tras un 8 semanas de protocolo de entrenamiento en atletas entrenados. Los grupos consistieron en la realización de pliometría, combinación primero EMS seguido de pliometría, combinación primero de pliometría y seguido de EMS, y un último grupo que combinaba a la vez la pliometría y EMS. Los resultados de este estudio, indicaron que todos los protocolos generaron mejoras tanto en el salto como en velocidad en carrera. Sin embargo, se concluye que las mejoras en el salto vertical debería realizarse primero la EMS seguido de la pliometría. Para la mejora de la velocidad, los atletas deberían combinar ambos métodos (EMS y Pliometría) o utilizar la Pliometría primero seguido de la EMS. En aquellos deportes en los que se requiera de ambas habilidades, no se remendará el método simultáneo (EMS y Pliometría).

Martínez-López et al. (2012), realizaron un estudio en que comparaban y combinaban diferentes protocolos de entrenamiento con EMS con distintas frecuencias y pliometría durante ocho semanas, con el objetivo de ver con qué tipo de entrenamiento se daban mejores resultados en los saltos verticales (SJ, CMJ y DJ) en atletas jóvenes entrenados. Los resultados de este

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

estudio, indicaron que la combinación de EMS (150 Hz) y pliometría, proporcionaba mejores resultados para la mejora en los saltos verticales.

Wirtz et al. (2016), realizaron un estudio en deportistas de diferentes disciplinas, en el que comparaban dos protocolos de entrenamiento en el que un grupo utilizaba la EMS en combinación con el entrenamiento de fuerza, y el otro no durante 6 semanas (2 veces por semana). Ambos grupos realizaron el mismo entrenamiento de sentadillas realizando 4 series de 10 repeticiones máximas. El objetivo de este estudio, fue analizar qué grupo de entrenamiento generaba mejores resultados en relación a los niveles de fuerza y potencia, carrera en sprint y saltos verticales. Los resultados de este estudio indicaron que en ambos protocolos se dieron mejoras importantes en fuerza y potencia, saltos y carrera en sprint. Sin embargo, únicamente en el ejercicio de flexión de rodilla (leg curl), se mostraron mejoras en el grupo de EMS en combinación con el entrenamiento voluntario de fuerza con respecto al grupo que no utilizó EMS, pudiendo ser debido a la descompensación a nivel muscular de los músculos antagonistas (isquiotibiales) con respecto a los agonistas.

Schuhbeck et al. (2019), realizaron un estudio a jugadores aficionados de hockey hielo, en el que analizaron los efectos producidos tras un protocolo de entrenamiento de EMS de cuerpo entero consistente en una sesión de 20 minutos a la semana (85Hz), en relación a variables como la velocidad en el tiro, altura y potencia en CMJ, 10 metros de carrera en sprint y máxima fuerza isocinética. Los resultados de este estudio, indicaron que con la EMS de cuerpo entero disminuyó el tiempo en los 10 metros de carrera en sprint (Skating), aumentó la potencia en el salto (CMJ) así como la fuerza máxima isocinética.

1.3.3. Entrenamiento Clúster.

El entrenamiento clúster tiene un alto interés dentro del mundo de la investigación del ejercicio físico, debido a la particularidad de aliviar la fatiga aguda neuromuscular en sesiones de entrenamiento de la fuerza y con ello permitir una continuidad en el rendimiento de los deportistas. Sin embargo, esta metodología tan novedosa, carece de uniformidad entre la

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

utilización de las variables, puesto que muchos autores intentan comparar protocolos muy diferentes con la misma terminología.

La modificación de las variables del entrenamiento pueden ser múltiples y son indispensables para generar estímulos, recuperación o incluso evitar el sobreentrenamiento, tanto en sujetos rendimiento como de alto nivel (Plisk & Stone, 2003).

Debemos conocer la terminología empleada tanto a nivel de rendimiento como en el contexto de la investigación referente al entrenamiento con cargas. En relación a la variabilidad de los componentes del entrenamiento, podemos mencionar varias metodologías como por ejemplo recuperación inter-repetición (IRR), el cual hace referencia a inclusión de descansos entre las repeticiones. Por otro lado, encontramos la recuperación intra-serie (ISR) o Clúster, el cual está asociado a inclusión de descansos entre conjunto o agrupaciones de repeticiones. Por último, el entrenamiento tradicional también llamada recuperación inter-serie, el cual incluye los descansos entre las distintas series (Lawton et al., 2006).

Por tanto, el entrenamiento Clúster, podemos definirlo como la realización de un determinado número de repeticiones, en los que se permite un descanso o recuperación entre cada una de las repeticiones, con el objetivo de favorecer la recuperación y con ello, retrasar la aparición de la fatiga o lo que es lo mismo, la inclusión de periodos de descanso incompletos dentro de la propia serie. Es decir, tiene un tipo de configuración en el que entre cada repetición de trabajo se alternan entre 10 y 30 segundos de descanso (Haff et al., 2003), así como un descanso más largo entre cada serie o grupo (Tufano et al., 2017a) de repeticiones. Esta configuración de los componentes de la carga, pueden ser manipulados modificando los intervalos de descanso a la resistencia en cada repetición. Además, estas configuraciones han resultado efectivas generando una alteración mecánica, metabólica y perceptiva al compararla con el entrenamiento tradicional (González-Hernández et al., 2020).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Esta metodología está orientada como alternativa a los programas de entrenamiento de fuerza tradicional, en la que se realizan entre una y tres repeticiones por serie y con ello, generar unos bajos niveles de fatiga muscular y facilitando por tanto la recuperación. Otra de las ventajas de esta metodología de entrenamiento, es que debido a su estructura, se puede producir una mayor fuerza, potencia y velocidad en cada repetición al incluir estos descansos entre repeticiones resultando muy interesante en deportes explosivos.

En definitiva, esta metodología corresponde a un método potencial para reducir la fatiga muscular es a través del protocolo de entrenamiento clúster (Haff et al., 2003), el cual incluye cortos periodos de descanso entre repeticiones en una misma serie. Los clúster, permiten a los deportistas mantener altos niveles de fuerza y velocidad durante más tiempo en comparación con el entrenamiento tradicional (Tufano et al., 2017b).

Identificamos una serie de estudios (Lawton et al., 2006; Oliver et al., 2013), en los que comparan los efectos que se producen entre los programas del entrenamiento de fuerza tipo clúster, en comparación con programas de entrenamiento de fuerza tradicionales en deportistas profesionales de deportes colectivos como el fútbol, baloncesto o rugby.

Hansen et al. (2011), mostraron que ambos protocolos de entrenamiento (tradicional y clúster), consiguieron mejoras significativas en relación a la fuerza máxima (1RM), a pesar de que con el entrenamiento tradicional, se mejoró la 1RM un poco más (un 4% aproximadamente). En la misma línea de resultados, Lawton et al. (2004), también encontraron mejoras significativas de fuerza máxima en test de 6 RM, siendo también superiores en el entrenamiento tradicional con respecto al entrenamiento clúster (un 5% aproximadamente).

Otros autores como Folland et al. (2002), realizaron una comparativa entre entrenamientos (entrenamiento tradicional y entrenamiento clúster) y con la misma carga pero con protocolos diferentes en relación al tiempo de descanso. En su estudio, se mostró que ambos protocolos de entrenamiento, mostraron valores muy similares en los niveles de fuerza, pero no en la fatiga, siendo ésta, muy superior en el entrenamiento tradicional. Por tanto, resulta muy interesante este tipo de metodología de entrenamiento ya que a pesar de que consigue elevados picos de fuerza, no genera tanta fatiga en los músculos y sistema nervioso y pudiendo prolongar más su entrenamiento y con ello, mejorar el rendimiento.

Latella et al. (2019), realizaron una revisión sistemática y meta-análisis de las respuestas neuromusculares agudas en el entrenamiento clúster. De manera general, se llega a la conclusión de que esta metodología de entrenamiento, es una estrategia útil para maximizar la pérdida de velocidad, potencia y fuerza durante el entrenamiento con cargas. Sin embargo, no queda claro, si estos beneficios se relacionan con todos los ejercicios de fuerza, si hay diferencia entre sexos o si tiene una duración en el tiempo.

Con el entrenamiento clúster, se ha incrementado el interés como objeto de estudio, debido a su capacidad para maximizar las adaptaciones musculares, generar sobrecarga, mantener los niveles de intensidad en el entrenamiento así como minimizar el sobreentrenamiento (Tufano et al., 2017c).

A pesar de su interés creciente por parte de la comunidad científica así como por los preparadores profesionales, los beneficios del clúster continúan siendo muy limitados. Estudios recientes, relacionan la aplicación de la metodología clúster con una reducción de la fatiga (Joy et al., 2013; Oliver et al., 2015; Tufano et al., 2016; Tufano et al., 2017a; Tufano et al., 2017b; Tufano et al., 2019), así como un mantenimiento de la fuerza velocidad y potencia con respecto al entrenamiento con cargas tradicional (Haff et al., 2003; Hardee et al., 2012; Tufano et al.,

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

2017b; Tufano et al., 2017c; Tufano et al., 2019; Tufano et al., 2020). Con el entrenamiento clúster, se conserva la técnica en los movimientos de los ejercicios debido a la aparición tardía de la fatiga, debido a una combinación de factores centrales (neurales) y musculares periféricos (Zajac et al., 2015; Enoka & Duchateau, 2016). Durante muchos años, se ha afirmado que la fatiga muscular por la llegada al fallo en las repeticiones, es beneficioso para el desarrollo de la fuerza. Sin embargo, sigue siendo discutible, incluso podría afectar de manera negativa al desarrollo de la potencia (Nobrega & Libardi, 2016). Además, encontramos varios estudios en los que con el entrenamiento clúster, no influye en la fuerza, velocidad o potencia de salida (Asadi & Ramirez-Campillo, 2016; Nicholson et al., 2016; Yazdani et al., 2017).

Esta discrepancia o diferencia de resultados, hace referencia a una falta clara en su metodología ya que existe una gran variabilidad en la utilización de los componentes de la carga, debido a las grandes posibilidades que presenta esta metodología. Además, los estudios que encontramos en relación a esta metodología, tienen su aplicación en diferentes ejercicios de fuerza tales como la sentadilla (Boullousa et al., 2013; García-Ramos et al., 2015; García-Ramos et al., 2016; Iglesias-Soler et al., 2012; Iglesias-Soler et al., 2014; Joy et al., 2013; Marshall et al., 2012; Mayo et al., 2014; Mora-Custodio et al., 2018, Nickerson et al., 2018; Nickerson et al., 2019; Oliver et al., 2015; Oliver et al., 2016b; Rio-Rodríguez et al., 2016; Tufano et al., 2016; Tufano et al., 2017b; Tufano et al., 2017c; Wagle et al., 2021), sentadilla salto (Koefoed et al., 2018), press de banca (Lawton et al., 2006; Mayo et al., 2014), peso muerto (Moir et al., 2013), extensión de rodilla isométrica (Rio-Rodríguez et al., 2016) y power clean (Haff et al., 2003; Haff et al., 2008; Hardee et al., 2012).

Además, esta variabilidad encontrada, también se relaciona con la intensidad o nivel de carga utilizado. En la actualidad, encontramos estudios referente a la metodología clúster con cargas pesadas (Boullousa et al., 2013; Haff et al., 2003; Hardee et al., 2012; García-Ramos et al., 2016; Iglesias-Soler et al., 2012; Iglesias-Soler et al., 2014; Lawton et al., 2006; Marshall et al., 2012; Moir et al., 2013; Mora-Custodio et al., 2018; Nickerson et al., 2018; Nickerson et al.,

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

2019; Tufano et al., 2016; Wagle et al., 2021), cargas moderadas (Girman et al., 2014; Joy et al., 2013; Mayo et al., 2014; Mora-Custodio et al., 2018; Oliver et al., 2015; Oliver et al., 2016a; Tufano et al., 2016; Tufano et al., 2017c), cargas bajas (García-Ramos et al., 2016; Río-Rodríguez et al., 2016) así como cargas óptimas de rendimiento del deportista (García-Ramos et al., 2015; Koefoed et al., 2018).

Por otro lado, los diferentes tipos de clúster que encontramos en las referencias científicas, los cuales llevan distintos protocolos, hacen referencia a la recuperación intra-serie (Girman et al., 2014; Joy et al., 2013; Koefoed et al., 2018; Lawton et al., 2006; Moir et al., 2013; Oliver et al., 2015; Oliver et al., 2016a; Río-Rodríguez et al., 2016; Tufano et al., 2016; Tufano et al., 2017b), recuperación inter-repetición (Boullousa et al., 2013; García-Ramos et al., 2015; García-Ramos et al., 2016; Haff et al., 2003; Iglesias-Soler et al., 2012; Iglesias-Soler et al., 2014; Lawton et al., 2006; Mayo et al., 2014; Moir et al., 2013; Mora-Custodio et al., 2018; Nickerson et al., 2018; Nickerson et al., 2019; Wagle et al., 2021) o al descanso-pausa (rest-pause) (Marshall et al., 2012).

Mora-Custodio et al. (2018), analizaron en su estudio la respuesta mecánica y metabólica comparando diferentes protocolos de entrenamientos de fuerza en el ejercicio de sentadilla. Estos protocolos fueron una serie continua de repeticiones, y dos clúster (recuperación inter-repetición con 10 segundos de descanso entre cada repetición y otro recuperación inter-repetición con 20 segundos de descanso entre cada repetición). Los resultados, indicaron que la concentración de lactato e sangre como indicador de fatiga, resultó menor en ambos protocolos de entrenamiento clúster que en el de repeticiones continuas, así como una menor pérdida de velocidad en el movimiento. Entre los protocolos clúster, no se encontraron diferencias importantes.

Río-Rodríguez et al. (2016), realizaron un estudio en el que analizaban los efectos producidos en la fatiga central y neuromuscular, así como la respuesta cardiovascular en dos

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

diferentes protocolos de entrenamiento como son el entrenamiento tradicional y el entrenamiento clúster en el ejercicio de extensión isométrica de rodillas. Los resultados, indicaron que el entrenamiento clúster, alcanzó valores más bajos en relación a la fatiga central y neuromuscular, así como una menor actividad cardiovascular con respecto al entrenamiento tradicional.

García-Manso et al. (2016), analizaron en su estudio como la aplicación de descansos entre grupos de repeticiones de fuerza máxima isométrica, podía afectar al mantenimiento de la contracción máxima voluntaria. Para ello, se distinguieron dos grupos de deportistas (Deportistas de fuerza y deportistas de resistencia) que hicieron una serie de pruebas como son un test aeróbico, concentración de lactato en sangre, CMJ y análisis de la composición corporal. Los resultados obtenidos en este estudio, indicaron que con la aplicación correcta de descansos entre grupo de repeticiones o de tiempos en las diferentes pruebas, se ayuda a retrasar la aparición de la fatiga y con ello mantener durante más tiempo el rendimiento en el entrenamiento.

Varela-Olalla et al. (2020), realizaron una comparativa entre el entrenamiento tradicional y el entrenamiento clúster en sujetos entrenados en el ejercicio de media sentadilla, analizando la velocidad de la barra, CMJ y el lactato en sangre. Sus resultados observaron que con el entrenamiento clúster, reduce la acumulación del lactato y con ello la fatiga muscular en comparación con el entrenamiento tradicional.

La metodología de entrenamiento clúster (recuperación inter-repetición), ha generado una gran popularidad en el mundo de la investigación científica en las ciencias del ejercicio, consistiendo en pequeños intervalos de descanso entre repeticiones o bloques de repeticiones durante una serie a diferencia del entrenamiento tradicional, en la que tras la realización de una serie de repeticiones, se realiza un descanso concreto (Tufano et al., 2017a). Esta metodología, resulta tan interesante debido a que se han obtenido mejoras tanto en la velocidad como en la potencia (Mora-Custodio et al., 2018), así como una reducción de la fatiga muscular (Tufano et

al., 2018), velocidad de la barra (Morales-Artacho et al., 2018) y fuerza muscular (Oliver et al., 2013). Sin embargo, existen otros estudios que han obtenido resultados contradictorios, no obteniendo mejoras o diferencias con respecto al entrenamiento tradicional (Davies et al., 2020).

Tufano et al. (2019), realizaron una comparativa entre el entrenamiento tradicional por series y descansos concretos y una serie de protocolos de entrenamiento clúster en el ejercicio de extensión de rodillas en relación a la oxigenación muscular, RPE y TMG en la máquina isocinética. Los resultados obtenidos, indican que con el entrenamiento clúster se obtienen mejores valores para mantener el rendimiento sobre todo durante la realización de ejercicios explosivos, así como obtener una recuperación más rápida.

Dello-Iacono et al. (2019), realizaron una comparativa entre diferentes protocolos de entrenamiento como son el entrenamiento tradicional y el entrenamiento clúster, con el objetivo de analizar el rendimiento en el salto vertical (CMJ). Sus conclusiones indicaron, que con ambos protocolos de entrenamiento se obtuvieron un rendimiento en el salto vertical. Sin embargo el entrenamiento clúster, obtuvo mejores resultados que el entrenamiento tradicional debido a la reducida acumulación de la fatiga muscular.

En relación a la estructura, con el entrenamiento tradicional, realizamos un número determinado de repeticiones en una serie con un descanso concreto entre cada serie. Con respecto al entrenamiento clúster, podemos diferenciar en utilizar un descanso entre cada grupo de repeticiones (recuperación intra-serie), entre repeticiones (recuperación inter-repetición) o tras el fallo muscular (rest pause) para poder continuar inmediatamente con las repeticiones.

Jukic y Tufano (2019), realizaron una comparativa entre los protocolos de entrenamiento clúster (5x6 repeticiones con 2 minuto de descanso) y entrenamiento tradicional (3x10

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

repeticiones con 4 minutos de descanso), en el que se analizaba los efectos referentes a la velocidad media, potencia media, así como la RPE. Utilizaron la misma carga en ambos protocolos (70% 1RM). Los resultados obtenidos, nos indicaron que al trabajar a la misma carga, no se encontraron diferencias significativas entre la velocidad y potencia media. Sin embargo, sí se encontraron diferencias importantes en RPE a favor del entrenamiento clúster. Por tanto, en este estudio no se encontraron diferencias importantes entre ambos protocolos utilizando cargas submáximas (70% 1RM) sin llegar al fallo muscular.

Torrejón et al. (2019), realizaron una comparativa entre diferentes protocolos de entrenamiento, tales como el entrenamiento con cargas tradicional así como dos configuraciones distintas de clúster (recuperación intra-serie e recuperación inter-repetición), analizando variables como los parámetros de fuerza-velocidad. Las conclusiones obtenidas en este estudio, indican que no se encontraron diferencias significativas respecto a la velocidad entre los protocolos por lo que destacan modificar las variables de entrenamiento.

Koefoed et al. (2018), realizaron en su estudio una comparativa entre el entrenamiento con cargas tradicional y el entrenamiento clúster con el objetivo de identificar con cuál de estos entrenamientos resulta más óptimo para desarrollar la potencia máxima sin la pérdida de la técnica en el ejercicio de sentadilla. Los resultados obtenidos, indican que con el entrenamiento clúster, se obtienen mayores picos de potencia con respecto al entrenamiento tradicional.

Bret et al. (2018), realizaron una comparativa entre diferentes protocolos en el entrenamiento con cargas como son el entrenamiento tradicional y dos variantes de entrenamiento clúster (30 y 60 segundos entre cada repetición), con el objetivo de identificar que protocolo de entrenamiento estaba más relacionado con el rendimiento en futbolistas colegiados. Para ello, utilizaron la misma carga con 1 única serie de 3 repeticiones al 85% 1 RM. Los resultados de este estudio, indicaron que con el entrenamiento clúster con 30 segundos entre

repeticiones fue el que mejores resultados obtuvo en comparativa con las otras metodologías.

Tufano et al. (2018), realizaron una comparativa entre ambos protocolos (entrenamiento tradicional y clúster), con el objetivo de analizar que medio era más óptimo para desarrollar la potencia en sentadillas, en base a con qué método se podían hacer más repeticiones sin bajar del 90% de potencia máxima. Los resultados de este estudio, observaron que con el entrenamiento clúster, se obtuvo un mayor volumen de repeticiones sin bajar del 90% de potencia con respecto al entrenamiento tradicional.

Arazi et al. (2018), analizaron durante 8 semanas de entrenamiento los efectos producidos en 3 protocolos distintos de entrenamiento, tales como el entrenamiento clúster, entrenamiento tradicional así como un grupo de control. El objetivo de este estudio, era analizar las mejoras producidas en las distintas variables como eran las medidas antropométricas, salto vertical, sprint, 1RM en sentadillas, press de banca, press militar y peso muerto, así como variables hormonales como la testosterona, cortisol y la insulina. Los resultados de este estudio, afirmaban que con el entrenamiento clúster se obtenían diferencias significativas en el salto vertical respecto al entrenamiento tradicional y grupo de control. En el resto de variables, también se produjeron mejoras, no siendo significativas a excepción de los sprints en los que no se detectaron diferencias.

García-Ramos et al. (2017), realizaron una comparativa entre diferentes protocolos de entrenamiento como son el entrenamiento tradicional y entrenamiento clúster, con el objetivo de analizar las respuestas producidas desde el punto de vista metabólico (concentración de lactato en sangre) y mecánico (velocidad del movimiento). Se compararon dos variaciones en el protocolo de entrenamiento tradicional (3x10 y 6x5 sin tiempo de descanso entre repeticiones) y tres variaciones en el entrenamiento clúster (3x10 con 5, 10 y 15 segundos de descanso entre repeticiones), siempre trabajando con la misma carga en todos los protocolos (10RM). Los

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

resultados obtenidos en el estudio, indican que el entrenamiento tradicional 6x5 repeticiones sin descanso y los entrenamientos clúster 3x10 con 10 y 15 segundos de descanso son los que generan una mayor velocidad de salida en press de banca. Sin embargo, solo los entrenamientos clúster 3x10 con 10 y 15 segundos de descanso entre repeticiones, produjeron una menor concentración de lactato en sangre con respecto al entrenamiento tradicional.

Morales-Artacho et al. (2018), realizaron una comparativa entre el entrenamiento tradicional y el entrenamiento clúster, con el objetivo de analizar la fuerza, velocidad y potencia del tren inferior a través del salto CMJ. El entrenamiento tradicional, consistió en 6x6 repeticiones contínuas con 5 minutos de descanso entre repeticiones mientras que el entrenamiento clúster consistió en 6x(3x2) con 30 segundos de descanso cada 2 repeticiones y de 4 minutos y 30 segundos entre cada serie. Los resultados de este estudio, indican que con el entrenamiento clúster, se obtienen resultados más eficientes para desarrollar adaptaciones de velocidad y potencia con respecto al entrenamiento tradicional.

Tufano et al. (2017c), realizaron una comparativa entre el entrenamiento tradicional (3x12 repeticiones al 60% 1RM) y dos variaciones del entrenamiento clúster (el primero con 3 bloques de 4 series de 4 repeticiones al 75% 1RM y el segundo clúster con 3 bloques de 6 series de 2 repeticiones al 80% 1RM) en el ejercicio de sentadillas, con el objetivo de analizar variables mecánicas. Los resultados obtenidos, indicaron que con los descansos entre cada serie de los entrenamientos clúster se permitieron mayores cargas externas que con el entrenamiento con cargas tradicional, aumentando la carga total de trabajo y el tiempo bajo tensión. Siendo por tanto el entrenamiento clúster, una alternativa excelente para desarrollar la fuerza y la hipertrofia.

Tufano et al. (2016), realizaron una comparativa entre un protocolo de entrenamiento tradicional y dos protocolos de entrenamiento clúster, en el ejercicio de sentadillas con el objetivo de analizar la fuerza, velocidad y potencia para determinar con qué metodología se genera un mayor índice de fatiga. Los resultados de este estudio, nos indican que con el

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

entrenamiento clúster se mantienen la velocidad y la potencia, dándose con ello una tardía aparición de la fatiga en comparación con el entrenamiento tradicional.

Asadi y Ramirez-Campillo (2016), realizaron una comparativa entre protocolos de entrenamiento como son el entrenamiento tradicional y el entrenamiento clúster de 6 semanas, con el objetivo de analizar el rendimiento en saltos como el countermovement jump (CMJ) y standing long jump (SLJ), así como en la velocidad (carrera de 20-40 metros) y agilidad (t-test). Los resultados de este estudio, indicaron que no se encontraron diferencias significativas en ninguna prueba entre ambos protocolos, Sin embargo, el entrenamiento clúster obtuvo mayores valores en los saltos (CMJ y SLJ) y agilidad (t-test) con respecto al entrenamiento tradicional. Por otro lado, el entrenamiento tradicional, consiguió mayores valores en la prueba de velocidad (carrera de 20-40 metros) con respecto al entrenamiento clúster.

Oliver et al. (2015), realizaron un estudio comparativo entre el entrenamiento con cargas tradicional (4x10 repeticiones con 2 minutos de descanso entre serie) y el entrenamiento clúster (4x (2x5) con 1 minuto y 30 segundos de descanso entre series y 30 segundos de descanso entre clúster), tanto para deportistas entrenados como en entrenados en fuerza, ambos al 70% 1 RM en sentadillas, con el objetivo de analizar la potencia media y el tiempo bajo tensión. Los resultados de este estudio, indicaron que con el entrenamiento clúster, se generó una mayor potencia media, incrementando las repeticiones, además de un menor tiempo bajo tensión en deportistas entrenados.

Por tanto, además de que con la metodología de entrenamiento clúster, se consigue una mejor recuperación y retraso de la aparición de la fatiga, se consiguen valores más elevados en relación a la fuerza, velocidad y potencia en cada una de las repeticiones en comparación con el entrenamiento tradicional de series, repeticiones y descansos concretos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

1.4. EVALUACIÓN Y CONTROL DE LA FUERZA MUSCULAR Y LA HIPERTROFIA.

A continuación, vamos a exponer las diferentes metodologías para evaluar o medir la hipertrofia así como la fuerza como manifestación propia del entrenamiento.

1.4.1. Evaluación de la fuerza muscular:

Podemos evaluar y controlar la fuerza muscular desde diferentes metodologías y dispositivos entre los que destacamos los siguientes:

- Repetición máxima (RM): La evaluación de la fuerza muscular se puede utilizar para diversas orientaciones. En primer lugar, se puede utilizar para conocer unos valores de referencia o punto de partida en los que se encuentra el deportista. En segundo lugar, para realizar un seguimiento y controlar el progreso en un momento concreto y por último y en tercer lugar para evaluar su eficacia o rendimiento. Los medios que se utilizan para evaluar dicha variable son dinamómetros isométricos, plataformas de fuerza, pesos libres, máquinas de resistencia constante o máquinas isoinerciales (Heyward, 2008).

Por tanto, se mide como una repetición máxima (1RM) la cual hace referencia a la máxima cantidad de peso que puede ser desplazada una vez a lo largo de todo el rango articular con una técnica correcta (Magyari, 2010), muy cercana a la ausencia de movimiento (isométrica) (González-Badillo & Izquierdo, 2008). Ésta, se obtiene por un protocolo de ensayo error (Heyward, 2008) que puede realizarlo cualquier persona independientemente de la edad, aunque siempre con la especial atención en la técnica y características del sujeto para no provocar ninguna lesión. Sin embargo, en sujetos no entrenados resulta más interesante las pruebas de fuerza con pesos submáximos para que tengan una mejor adaptación y evitar así, cualquier riesgo de lesión. Existen variantes de estimaciones como pueden ser 5RM o 10RM. En la actualidad, existen numerosos protocolos para calcular la repetición máxima como los protocolos de Nacleiro y Figueroa (2004) o Baechle y Earle (2000).

- Dinamometría:
 - Dinamometría manual: Hace referencia a un test muy utilizado en poblaciones sedentarias, aunque también es muy utilizado para el control del entrenamiento. Su ejecución se realiza con una progresiva presión con la mano lo más fuerte posible, manteniéndolo de 2 a 5 segundos.
 - Dinamometría lumbar: Hace referencia a un test o prueba que mide la fuerza máxima isométrica a nivel lumbar e isquiotibial. A diferencia del anterior, este test precisa de un aprendizaje técnico previo a la medición, con el objetivo de minimizar las posibles lesiones en la espalda baja.

- Plataformas de fuerza: Hace referencia a una superficie cuadrangular con 4 transductores o sensores de presión, los cuales nos indican un voltaje similar a la fuerza aplicada, permitiendo con ello, medir la fuerza de reacción en la plataforma en los 3 planos de movimiento. Mediante su uso, además de la fuerza, podremos registrar la altura y la velocidad del salto, de tal manera que, a partir de esta información, se pueden obtener determinados valores relativos al pico de fuerza. A continuación, destacamos algunos de los saltos más estudiados en la literatura científica en las ciencias del ejercicio.
 - Salto vertical con contramovimiento (CMJ): La ejecución del salto se realiza mediante una flexo-extensión de rodillas y sin pausas entre las fases excéntrica y concéntrica del movimiento. Al finalizar la fase excéntrica o negativa, las rodillas deben formar un ángulo de 90°, para iniciar la fase concéntrica, donde el sujeto intenta alcanzar la máxima altura posible. Los brazos permanecen estáticos detrás de la espalda para no ayudarse en la fase de impulso. El CMJ está asociado con una mayor altura y potencia de salto debido a que permite ejercer mayor fuerza sobre la superficie de impulso.
 - Salto vertical con contramovimiento y swing de brazos (CMJas): Igual que el salto CMJ, con la diferencia de que en este salto, se permite la utilización de las extremidades superiores en la fase de impulso y poder ayudar al salto.
 - Salto vertical sin contramovimiento (SJ): Se parte desde una posición de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

isométrica con un ángulo de flexión de la rodilla de 90°. Las manos se fijan en las caderas para eliminar el impulso de las extremidades superiores. A diferencia del salto con contramovimiento, no se produce el pre-estiramiento de los músculos y tendones, por lo que no se utiliza el potencial elástico procedente de dicho estiramiento, siendo la altura del salto significativamente menor.

○ Transductores de velocidad y posición: Hace referencia al llamado Encoder, el cual es una herramienta o dispositivo electromecánico con un software incorporado, que nos permite obtener una serie de variables como la fuerza, la velocidad, la potencia y el trabajo mecánico (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Este dispositivo, que dispone de un sensor, presenta un cable en su interior, el cual se engancha a la carga externa (mancuerna o barra), de manera que al realizar el ejercicio en línea vertical (sentadillas con barra o press de banca plano con barra), se obtienen valores de espacio, tiempo y con ello la velocidad, que asociado a una determinada carga, realizan una estimación de la fuerza muscular ejercida. Destacar que el Encoder lineal, surgió por la necesidad de encontrar nuevas formas y métodos de evaluación de la fuerza, más rápidas y prácticas que realizar todo el protocolo de 1RM. Además, aparte de tener un error de medición muy bajo, aporta una mayor cantidad de datos así como reducir el posible riesgo de lesión, el estrés fisiológico y reduce mucho el tiempo dedicado a todo el proceso de la evaluación. Actualmente, existen además encoders rotatorios que pese a que realizan las mismas funciones que los Encoders lineales, se utilizan para máquinas o dispositivos isoinerciales, los cuales llevan una rueda o volante de inercia como las poleas cónicas o las máquinas yoyo. Por tanto, los datos obtenidos con este tipo de dispositivos son velocidad, aceleración, potencia y fuerza instantánea, media y máxima, fuerza por unidad de tiempo), espacio total recorrido, así como gráficas y porcentajes de cada variable. Por otro lado, en la actualidad encontramos los transductores ópticos de posición que a través de una cámara de infrarrojos, permiten medir la posición en cada instante de tiempo, obteniendo por tanto multitud de variables. Sin embargo, estos dispositivos, resultan muy costosos, por lo que se utilizan solo para pruebas de laboratorio equipos profesionales.

○ Valoraciones funcionales: Hacen referencia a la medición de la capacidad física de la fuerza, a través de una serie de ejercicios en los que a través de un protocolo técnico, se obtienen unos parámetros sujetos a unos baremos referentes a su edad y sexo. Estos ejercicios son los saltos verticales (abalakov, SJ, CMJ, DJ), saltos horizontales (standing long jump), abdominales, fondos (push ups), dominadas (pull ups), plancha abdominal y lanzamientos con balón medicinal).

○ Tecnologías portátiles: También conocidas con el nombre de “wereables” las cuales han tenido mucho éxito en el mercado debido a las fuertes campañas de publicidad en las redes sociales, de manera que ha llegado al alcance de todo tipo de usuarios. Estas aplicaciones se instalan en los dispositivos móviles, de manera que hace que sea una herramienta muy práctica y portátil. Entre las wereables destacamos las siguientes:

- Acelerómetros: Hacen referencia a unos dispositivos muy fiables así como sofisticados por lo que tienen un alto coste de mercado. Sin embargo, en la actualidad son más accesibles ya que pueden estar incorporados en el teléfono móvil o en un dispositivo como un brazalete, los cuales cuentan con un acelerómetro triaxial además de un giroscopio. Los datos obtenidos como la velocidad, aceleración, distancia, calorías, o frecuencia cardíaca, son enviados a la aplicación móvil a través de bluetooth, para poder ser analizados y reflejados para poder finalmente interpretarlos.
- Video-análisis: Hace referencia a un transductor óptico que identifica y analiza los cambios de posición en el tiempo de los deportistas. Sin embargo, con los avances tecnológicos, a través de un dispositivo móvil de última generación, se pueden realizar grabaciones de determinados gestos técnicos y poder estimar variables como la velocidad a través del espacio y tiempo. Para ello, se necesitará cámara de alta velocidad y una aplicación que permita analizar fotograma a fotograma cada parte del gesto técnico.

○ Dinamometría isocinética: Hacen referencia a la técnica que estudia la fuerza muscular realizada de forma dinámica, con un rango de movimiento determinado, así como con una

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

velocidad constante y programada, por lo que la resistencia se ajusta a la fuerza aplicada por el deportista. Su utilidad es muy frecuente y casi exclusiva en el campo de la investigación, pero sobre todo en fases de rehabilitación y readaptación con el objetivo de conocer más en detalle el estado de la musculatura a nivel concéntrico y excéntrico así como de las capacidades que en ese momento dispone. Como aspectos negativos, podemos decir que este dispositivo, no reproduce correctamente los movimientos de cualquier deporte en concreto en relación al ángulo articular como pueden ser los lanzamientos o golpes, además de ser muy caros.

Como aspectos positivos, indicamos que con estos dispositivos, tenemos la posibilidad de obtener datos objetivos en relación a la fuerza, potencia, aceleración según cada rango articular, combinándolo con gráficas comparativas, curvas de fuerza entre otras.

- Tensiomiografía: Hace referencia a una herramienta inocua, no agresiva y no invasiva en la que el deportista no requiere de realizar ningún esfuerzo físico, siendo muy utilizada para evaluar las estructuras musculares a través de estimulaciones eléctricas de moderada o baja intensidad (1-10 mA), a través de un sensor mecánico colocado sobre la piel a una presión constante. Con esta metodología, podemos evaluar el estado de los músculos superficiales con el objetivo de conocer las necesidades concretas y óptimas actuales del deportista. La información que nos da, va en relación a la respuesta aguda y crónica del músculo como por ejemplo las características histoquímicas del tipo de fibra muscular, el nivel de fatiga neural o estructural, las propiedades contráctiles del músculo o el balance muscular, a las distintas cargas de entrenamiento como son la fuerza, resistencia, velocidad y flexibilidad independientemente de otros factores como la carga de entrenamiento soportado o el estado de fatiga.

1.4.1.1. Ecuaciones predictivas: Hace referencia a aquella metodología de estimación de fuerza máxima (RM) a través de una serie de fórmulas o test de repeticiones hasta el fallo técnico. A partir de cargas submáximas, podemos estimar la RM con la ayuda de formulas y tablas. Éstas son:

- Fórmulas lineales.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- (Lander, 1985) $1RM = \text{kilogramo} / (1,013 - 0,0267123 * \text{repeticiones})$
 - (Lombardi, 1989) $1RM = (\text{repeticiones} 0,1) * \text{kilogramo}$
 - (O'Connor et al., 1989) $1RM = 0,025 (\text{kilogramo} * \text{repeticiones}) + \text{kilogramo}$
 - (Brzycki, 1993) $1RM = \text{kilogramo} / (1,0278 - 0,0278 * \text{repeticiones})$
 - (Abadie, 1999) $1RM = \text{kilogramo} + \text{repeticiones} / 8,841 + (1,1828 * \text{repeticiones})$
 - (Berger, 1970) $1RM = \text{kilogramo} * \text{repeticiones} * 0,03 + \text{kilogramo}$
 - (Welday, 1988; Epley, 1985) $1RM = (\text{kilogramo} * 0,0333 * \text{repeticiones}) + \text{kilogramo}$
 - (Adams, 1998) $1RM = \text{kilogramo} / 1 - (0,02 * \text{repeticiones}) + \text{repeticiones}$
- Fórmulas exponenciales.
- (Berger, 1961) $1RM = \text{repeticiones} + \text{kilogramo} / (1,0261 * e^{-0,00262 * \text{repeticiones}})$
 - (Wathen, 1994) $1RM = \text{kilogramo} / ((48,8 + 53,8 * e^{-0,075 * \text{repeticiones}}) / 100)$
 - (Mayhew et al., 1992) $1RM = \text{kilogramo} / ((52,2 + 41,9 * e^{-0,055 * \text{repeticiones}}) / 100)$

1.4.1.2. *Evaluación de la hipertrofia muscular:* Existen numerosos métodos de evaluación en el crecimiento o desarrollo de la masa muscular (hipertrofia), como pueden ser:

- Doble absorciometría de rayos X: Considerado actualmente como el método no invasivo de referencia en el estudio de la composición corporal en el ámbito clínico, siendo muy aplicable, económico y con una radiación muy baja, midiendo diferentes componentes de la musculatura por separado. Sin embargo, presenta algunas desventajas como puede ser la zona de exploración o análisis ya que este método, se desarrolló para un grupo de edad muy determinado como son mujeres ancianas, por lo que presenta ciertas dificultades así como poca precisión en los datos para medir pequeños cambios en la masa muscular tras un protocolo de entrenamientos.
- Perímetros musculares: Hacen referencia a las mediciones de la circunferencia de distintas partes del cuerpo, las cuales están expresadas en centímetros. Al realizar una medición de los perímetros corporales con una cinta métrica, se incluyen además ligamentos, nervios, vasos

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

sanguíneos, tejido conectivo, sangre coagulada así como una capa de tejido adiposo que no es separable del músculo. En la antropometría, los perímetros corporales estiman la masa muscular con una corrección por parte de los pliegues cutáneos, los cuales se encargan de valorar la cantidad de tejido adiposo. Los perímetros utilizados para la mayoría de las fórmulas existentes en la literatura, son los perímetros de cuello, torso, cintura, cadera, brazo relajado, brazo contraído, antebrazo, muñeca, muslo, pierna y tobillo. En la actualidad, existen numerosos programas informáticos que al introducir los datos tanto de pliegues cutáneos como de perímetros corporales y diámetros óseos, así como el peso y estatura, te indican la cantidad estimada y aproximada de cada compartimento.

○ Fórmulas predictivas de estimación de hipertrofia: A lo largo de los años, han aparecido investigadores que mediante ecuaciones o fórmulas, realizaban una estimación aproximada de cada compartimento, así como también de la masa muscular global del sujeto. Además estas ecuaciones están sesgadas para cada tipo de población, así como su diferenciación por sexos y edades. Con el paso de los años, se han ido modificando las ecuaciones para minimizar los márgenes de error y conseguir una fórmula más objetiva y aplicable con mejores garantías de fiabilidad. A continuación, vamos a exponer una de las ecuaciones más utilizadas en el ámbito de la investigación como es la fórmula de Portman et al. (2005) para determinar en términos absolutos la masa muscular:

*Masa Muscular (Kg) = Altura en metros * ((0.0064 * Perímetro del brazo corregido elevado al cuadrado) + (0.0032 * Perímetro del muslo corregido elevado al cuadrado) + (0.0015 * Perímetro de la pierna corregido elevado al cuadrado)) + (2.56 * 1 por ser masculino) + (0.136 * edad en años)*

○ Tomografía computarizada: considerado junto con la resonancia magnética como uno de los métodos más precisos para evaluar la cantidad y distribución del músculo así como del tejido adiposo en el organismo. Esta metodología mide el área de la sección transversal del músculo de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

manera específica, siendo muy fiables y precisos sus datos. Como aspecto negativo, lo relacionamos con la alta dosis de radiación que transmite así como los altos costes de utilización del dispositivo.

○ Impedancia bioeléctrica: Hace referencia a un método basado en el principio de que la conductividad del agua del cuerpo varía en diferentes compartimentos, por lo que este método mide la impedancia a una pequeña corriente eléctrica aplicada a medida que pasa a través del cuerpo, haciendo así una estimación de la masa muscular. Esta metodología pese a ser más económico, presenta unos márgenes de error mucho mayores que los métodos anteriores ya que hay que tener en cuenta el instrumento, punto de colocación de los electrodos, nivel de hidratación, ciclo menstrual, alimentación o temperatura.

○ Biopsia muscular: Aunque actualmente no es muy común por la posibilidad de infección, esta metodología se basa en la extracción de tejidos y células de un músculo concreto para poder analizarlo y examinarlo a través de un microscopio. La información que obtenemos con este método, es observar y comparar los cambios morfológicos en la fibra muscular, así como saber qué tipo de fibras lo componen además de analizar su actividad enzimática y metabólica.

○ Resonancia magnética nuclear: Esta metodología permite proporcionar imágenes de los componentes corporales, así como de su composición química y corporal ya sea a nivel global o de un segmento concreto. Pese a que es un método muy válido, preciso y fiable, presenta la desventaja de que requiere un elevado coste, así como dificultades para su utilización y acceso y es por ello, también por lo que se utilizan más otros métodos más económicos, ya sea en la investigación como en el ámbito clínico.

○ Ultra sonido: Hace referencia a un método muy interesante en el que podemos cuantificar el grosor muscular de un segmento concreto, ángulos de penetración y estructuras fasciculares. Además, presenta ventajas como que es un dispositivo portátil, de bajo coste y de fácil manejo.

OBJETIVOS



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

2. OBJETIVOS.

En base a la revisión y contextualización realizada de la evidencia científica actual relacionada con la fatiga muscular y el entrenamiento de la fuerza, nos planteamos los siguientes objetivos de investigación, en relación a los estudios planteados:

Objetivo general:

Analizar la fatiga muscular y el descenso de rendimiento tras la realización de diferentes protocolos de entrenamiento de la fuerza del tren inferior.

Objetivos específicos:

2.1. ESTUDIO 1:

- Analizar la fatiga muscular localizada y la pérdida de rendimiento en el tren inferior, tras la realización de diferentes protocolos de entrenamiento hipertrófico con metodología Clúster en el ejercicio de sentadilla, utilizando peso guiado (Multipower) y peso libre (Rack), con y sin EMS.
- Comparar los efectos de utilizar en el ejercicio de sentadilla, un protocolo con peso libre o peso guiado sobre la fatiga muscular y la pérdida de rendimiento en el salto vertical, la fuerza isométrica máxima, así como sobre la percepción subjetiva del esfuerzo.
- Comparar los efectos de entrenar con EMS o sin EMS sobre la fatiga muscular y la pérdida de rendimiento en el salto vertical, la fuerza isométrica máxima, así como sobre la percepción subjetiva del esfuerzo.

En base a estos objetivos, las **hipótesis** que nos planteamos han sido las siguientes:

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- El entrenamiento hipertrófico con metodología clúster en el ejercicio de sentadilla, produce fatiga muscular y pérdida de rendimiento del tren inferior, tras los protocolos utilizados de peso guiado y peso libre, tanto con EMS como sin ella.
- El entrenamiento hipertrófico con metodología clúster en el ejercicio de sentadilla con peso libre, produce una mayor fatiga muscular y pérdida del rendimiento en el salto vertical, fuerza isométrica máxima y percepción subjetiva del esfuerzo en el tren inferior, con respecto al mismo protocolo de entrenamiento con el peso guiado.
- El entrenamiento hipertrófico con metodología clúster en combinación con EMS en el ejercicio de sentadilla, produce una mayor fatiga muscular y pérdida de rendimiento en el salto vertical, fuerza isométrica máxima y percepción subjetiva del esfuerzo, con respecto al mismo protocolo de entrenamiento sin EMS.

2.2. ESTUDIO 2:

- Analizar la fatiga muscular localizada en el tren inferior, tras un protocolo de fuerza hipertrófica utilizando peso libre (Rack).
- Analizar la fatiga muscular localizada en el tren inferior, tras un protocolo de fuerza hipertrófica utilizando una máquina isoinercial (Yoyo Squat).
- Comparar entre el entrenamiento con peso libre (Rack) e isoinercial (Yoyo Squat), la fatiga muscular generada, en relación a la capacidad de salto, la fuerza máxima isométrica, así como la percepción subjetiva del esfuerzo.

En base a estos objetivos, las **hipótesis** que nos planteamos han sido las siguientes:

- Los protocolos de entrenamiento de fuerza hipertrófica utilizando tanto una máquina isoinercial (Yoyo Squat) como peso libre (Rack) como medios de entrenamiento, generan de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

manera independiente, una fatiga muscular y una pérdida del rendimiento reflejado en las variables de SJ y CMJ, dinamometría de piernas y RPE.

- La fatiga muscular y la pérdida de rendimiento producidos por el entrenamiento de hipertrófia con una máquina isoinercial (Yoyo Squat), es superior a la producida por el mismo entrenamiento utilizando peso libre (Rack).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

MATERIAL Y MÉTODOS



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

3. MATERIAL Y MÉTODO.

3.1. MATERIAL UTILIZADO.

A continuación, vamos a indicar los materiales que hemos utilizado en la investigación:

- Báscula de impedancia bioeléctrica: Tanita®, SC 240-MA, (Japan).
- Pulsómetro: Polar®, RS800cx, (Finland).
- Bicicleta Elíptica: Technogym TM®, Synchro, (Italy).
- Algómetro: FPI®, Wagner Force One Fdix, (EEUU).
- Plataforma de contacto: Chronojump®, DIN A2, (Spain).
- Software: Chronojump® (Versión 1.7.1.), (Spain).
- Dinamómetro: Holtain®, Back D, (UK).
- Ordenador Portátil: HP®, Pavilion dv6 Intel(R) Core™ i7, (EEUU).
- Electroestimulación: Compex®, Performance, (Switzerland).
- Peso libre: Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, (Spain).
- Peso guiado: Technogym TM®, Máquina Smith Selection pro-Multipower, (Italy).
- Máquina isoinercial: Exxcentric®, Yoyo Squat Kbox 4 Pro System, (Sweden).

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL.

Pese a que se han planteados objetivos generales comunes a ambos estudios, tenemos que indicar que el diseño experimental ha sido diferente, debido a que se han realizado diferentes comparaciones entre los distintos medios de entrenamiento. Toda la intervención ha sido realizada en el centro de preparación física Golf del Guadiana de la ciudad de Badajoz (Figura 1).

A continuación, vamos a explicar cómo ha sido su organización.



Figura 1. Realización de los diferentes entrenamientos de fuerza.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

3.2.1. Estudio 1:

Se llevó a cabo un diseño cruzado aleatorizado con los 16 sujetos voluntarios que participaron en el estudio. Todos los sujetos, realizaron 4 sesiones de entrenamientos diferentes, con una semana de intervalo entre cada una de ellas, para que la fatiga muscular no tuviera influencia. Asimismo, no se permitió a ninguno de los participantes, ningún trabajo de fuerza del tren inferior durante toda la intervención. Sin embargo, sí se permitió el trabajo de fuerza del tren superior durante el periodo de las mediciones salvo en el día anterior a las pruebas.

El protocolo de investigación, se llevó a cabo durante 5 semanas y siempre a la misma hora (10:00 AM), con una temperatura ambiente de $24^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y con un nivel de humedad del $26\% \pm 2\%$. A continuación, vamos a representar en la Tabla 1, como han sido los procesos y orden de las mediciones de los 16 sujetos, los cuales se distribuirán en las cinco semanas de la siguiente manera:

Tabla 1. Orden y temporalización de los entrenamientos a los 16 sujetos.

	4 sujetos	4 sujetos	4 sujetos	4 sujetos
Toma de datos (Semana 1)	Información personal y consentimiento informado. Valoración de la composición corporal. Test de fuerza máxima en sentadillas (1 RM). Familiarización EMS			
Semana 2	Rack	Rack + EMS	Multipower	Multipower + EMS
Semana 3	Rack + EMS	Rack	Multipower + EMS	Multipower
Semana 4	Multipower	Multipower + EMS	Rack	Rack + EMS
Semana 5	Multipower + EMS	Multipower	Rack + EMS	Rack

Primera semana: En la primera semana de toma de datos, se les informó de los objetivos del estudio, así como todo los protocolos de las mediciones. Para ello, firmaron un

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

consentimiento informado (Anexo 1), en el que se comprometían a respetar todas las pautas de la investigación.

Posteriormente, los sujetos rellenaron un documento con información personal (Documento de toma de datos sesión de familiarización) (Anexo 3), y se les realizó una valoración de la composición corporal a través del método de bioimpedancia bioeléctrica (Báscula Tanita®, SC 240-MA, Japan) (Figura 2), para identificar los valores en cada compartimento (masa muscular, masa grasa y masa ósea).

Hecho ésto, se realizó un test de fuerza máxima (1RM), a través del protocolo desarrollado por Baechle y Earle (2000) en el ejercicio de sentadilla con peso libre (Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain) para determinar los valores de referencia y poder aplicar la carga asignada y estudiada en la investigación (70% 1RM).



Figura 2. *Báscula Tanita®, SC 240-MA, Japan.*

Finalmente, se realizó una última prueba de familiarización con la EMS (Electroestimulador Compex® Performance, Switzerland) (Figura 3), en combinación con trabajo voluntario en sentadillas, que nos indicarían las unidades de energía máximas que soporta

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

cada sujeto y con ello, establecer una intensidad más óptima durante las mediciones. Esta prueba consistió en la realización de 5 series de 3 repeticiones en sentadillas con la aplicación de EMS tanto en la fase concéntrica como excéntrica utilizando el programa llamado “*fuera resistencia*” (dentro de los programas predeterminados en el dispositivo Compex) a la máxima intensidad soportable en cada sujeto. De acuerdo con el estudio de Herrero et al. (2006), el protocolo de EMS consistió en la aplicación de una onda rectangular bifásica y simétrica de 60 Hz en la fase de contracción (8 segundos) y de 7 Hz en la fase de relajación (6 segundos). La intensidad de la corriente fue manejada por el investigador, ajustándose en cada contracción a la máxima soportable por el sujeto. Se utilizaron 3 electrodos autoadhesivos en cada muslo, siendo un electrodo negativo (10x5 cm) situado en la parte proximal del muslo, unos 10 centímetros por debajo de la espina ilíaca anterosuperior, y dos electrodos positivos (5x5 cm), situados en los puntos motores del vasto externo y vasto interno. En cada una de las repeticiones, los sujetos vencían una resistencia igual al 70 % de 1 RM.



Figura 3. *Electroestimulador Compex® Performance, Switzerland*

Semanas 2-5: Las siguientes 4 semanas, cada grupo realizó un entrenamiento con la metodología Clúster cada semana, ya sea con peso libre (Rack), peso guiado (Multipower), peso libre (Rack) con EMS y peso guiado (Multipower) con EMS, siguiendo todos, el mismo protocolo de valoración. Asimismo, todos los participantes siguieron las instrucciones del evaluador, tanto en las valoraciones iniciales como finales al entrenamiento como los

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

calentamientos, test de saltos verticales, valoración del dolor localizado, dinamometría de fuerza, RPE o frecuencia cardíaca entre otros.

Con respecto al calentamiento, indicar que se realizó por un lado un calentamiento general consistente en 5 minutos de la bicicleta elíptica (Technogym TM®, Synchron, Italy) (Figura 4) a 70 Watos de potencia, así como un calentamiento específico con trabajo de movilidad consistente en una serie de 15 repeticiones de flexión y extensión de tobillos, rodillas, caderas y rotación externa e interna de cadera.



Figura 4. *Elíptica Technogym TM®, Synchron, Italy.*

A continuación, explicamos cómo fueron diseñados los entrenamientos en función del medio utilizado. Asimismo, exponemos en la Tabla 2 como ha sido la metodología Clúster.

- Entrenamiento con peso libre (Rack) y guiado (Multipower) sin EMS: Hace referencia a un entrenamiento de fuerza hipertrofia en combinación con la metodología Clúster, en el ejercicio de sentadilla y utilizando peso libre (Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain) o peso guiado (Technogym TM®, Máquina Smith Selection pro-Multipower, Italy) (Figura 5) como medio de entrenamiento. Asimismo, esta metodología consistió en 3 bloques de 5 series de 3 repeticiones por serie y con un descanso de 6 segundos de entre series, y de 1 minuto entre cada bloque. Además, en los descansos entre series y entre

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

bloques, se dejó la barra en el Rack o en el Multipower para completar los descansos y el evaluador o ayudante, acompañó al sujeto tanto para sacar como para dejar la barra en el Multipower o en el Rack. Se utilizó una carga del 70% de 1RM, realizando el movimiento lo más rápido posible tanto en la acción concéntrica y excéntrica (1 segundo en cada una), medidos por el evaluador por un reloj o cronómetro de pared y con una angulación de 90° en la flexión de rodillas, colocándole por detrás a cada sujeto un banco a la altura óptima según su estatura. Las ayudas realizadas fueron similares en ambos medios donde el evaluador o ayudante, se sitúa detrás del sujeto sin llegar a tocar el tronco y acompañándole en el movimiento de cada repetición. En el caso de que el sujeto precisará de ayuda por no poder completar la repetición, el evaluador o ayudante le ayudará por detrás del tronco para poder levantar el peso. Además, en cada repetición, el investigador o ayudante, daba feedback constante al sujeto, animándole para ayudar a completar las repeticiones al nivel establecido.



Figura 5. *Technogym TM®*, Máquina Smith Selection pro-Multipower, Italy.

- Entrenamiento peso libre (Rack) y guiado (Multipower) con EMS: Hace referencia a la misma metodología que el entrenamiento con peso libre (Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain) y peso guiado (Technogym TM®, Máquina Smith Selection pro-Multipower, Italy) en el ejercicio de sentadilla, pero ahora con la aplicación de los impulsos eléctricos (EMS) en la musculatura del cuádriceps y a la máxima tolerancia soportada por el sujeto. El programa de EMS (Electroestimulador Compex®, Performance, Switzerland) llamado “*fuera resistencia*”, (con una frecuencia de 60 Hz en la fase de contracción y 7 Hz en la fase de reposo), consistió en la aplicación de impulsos eléctricos durante cada serie

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

(tanto en acción concéntrica como excéntrica), la cual tiene una duración de 8 segundos en los que el sujeto debe llegar a realizar 3 repeticiones con 2 segundos por repetición (1 segundo en acción concéntrica y 1 segundo en la acción excéntrica). Sin embargo, los impulsos eléctricos cesarán durante los descansos entre cada serie (6 segundos) y entre cada bloque (1 minuto). Al igual que el protocolo anterior, en los descansos entre series y entre bloques se dejó la barra en el Rack o en el Multipower para completar los descansos y el evaluador o ayudante, acompañó al sujeto tanto para sacar como para dejar la barra en el Multipower o en el Rack. De la misma manera, se utilizó una carga del 70% de 1RM, realizando el movimiento lo más rápido posible tanto en la acción concéntrica y excéntrica (1 segundo en cada una), medidos por el evaluador por un reloj o cronómetro de pared y con una angulación de 90° en la flexión de rodillas, colocándole por detrás a cada sujeto un banco a la altura óptima según su estatura. Asimismo, las ayudas realizadas fueron similares en ambos medios donde el evaluador o ayudante se sitúa detrás del sujeto, sin llegar a tocar el tronco y acompañándole en el movimiento de cada repetición. En el caso de que el sujeto precisará de ayuda por no poder completar la repetición, el evaluador o ayudante, le ayudará por detrás del tronco para poder levantar el peso. Además, en cada repetición, el investigador o ayudante, daba feedback constante al sujeto, animándole para ayudar a completar las repeticiones al nivel establecido.

Tabla 2. Protocolo de la metodología de entrenamiento Clúster.

Primer bloque		Segundo bloque		Tercer bloque	
Primera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Primera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Primera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso
Segunda Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Segunda Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Segunda Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso
Tercera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Tercera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso	Tercera Serie	3 Repeticiones 6'' Descanso
Cuarta Serie	3 Repeticiones	Cuarta Serie	3 Repeticiones	Cuarta Serie	3 Repeticiones

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Serie	6'' Descanso	Serie	6'' Descanso	Serie	6'' Descanso
Quinta	3 Repeticiones	Quinta	3 Repeticiones	Quinta	3 Repeticiones
Serie	6'' Descanso	Serie	6'' Descanso	Serie	6'' Descanso

3.2.2. Estudio 2:

Se llevó a cabo un diseño cruzado en el que todos los sujetos fueron agrupados en 2 grupos de 8, realizando 2 sesiones de entrenamientos diferentes, con una semana de intervalo entre cada una de ellas, para que la fatiga muscular no resultara como un factor de influencia. Asimismo, no se permitió a ninguno de los participantes, ningún trabajo de fuerza del tren inferior durante todo el proceso de las mediciones. Sin embargo, sí se permitió el trabajo de fuerza del tren superior durante el periodo de las mediciones, salvo en el día anterior a las pruebas.

El protocolo de investigación se llevó a cabo durante 3 semanas y siempre a la misma hora (10:00 AM), con una temperatura ambiente de $24^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y con un nivel de humedad del $26\% \pm 2\%$. A continuación, vamos a representar en la Tabla 3 como han sido los procesos y orden de las mediciones de los 16 sujetos, los cuales se distribuirán en las tres semanas de la siguiente manera:

Tabla 3. Orden y temporalización de los entrenamientos de los 16 sujetos.

	8 sujetos	8 sujetos
	Información personal y consentimiento informado.	
Toma de datos (Semana 1)	Valoración de la composición corporal. Test de fuerza máxima en sentadillas (1 RM).	
	Familiarización Yoyo Squat.	
Semana 2	Rack	Yoyo Squat
Semana 3	Yoyo Squat	Rack

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Primera semana: En la primera semana de toma de datos, se les informó de los objetivos del estudio, así como todo los protocolos de las mediciones. Para ello, firmaron un consentimiento informado (Anexo 2) en el que se comprometían a respetar todas las pautas de la investigación.

Posteriormente, los sujetos rellenaron un documento con información personal (Documento de toma de datos sesión de familiarización) (Anexo 3), y se les realizó una valoración de la composición corporal a través del método de bioimpedancia bioeléctrica (Báscula Tanita® SC 240-MA, Japan) para identificar los valores en cada compartimento (masa muscular, masa grasa y masa ósea). Hecho ésto, se realizó un test de fuerza máxima (1RM) a través del protocolo desarrollado por Baechle y Earle (2000) en el ejercicio de sentadilla con peso libre (Rack) (Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain) para determinar los valores de referencia y poder aplicar la carga asignada y estudiada en la investigación (70% 1RM).

Finalmente, se realizó una última prueba de familiarización con la máquina isoinercial (Exxcentric®, Yoyo Squat Kbox 4 Pro System, Suecia).en sentadillas, consistente en la realización de 1 serie de 15 repeticiones para que los sujetos se practicasen con el dispositivo.

Semanas 2 y 3: Las siguientes 2 semanas, cada grupo realizó un entrenamiento por semana con peso libre (Rack) o isoinercial (Yoyo Squat), siguiendo ambos, el mismo protocolo valoración. Asimismo, todos los participantes siguieron las instrucciones del evaluador tanto en las valoraciones iniciales como finales al entrenamiento, como en los calentamientos, test de saltos verticales, valoración del dolor localizado, dinamometría de fuerza, RPE o frecuencia

cardíaca entre otros. A continuación, explicamos cómo fueron diseñados los entrenamientos en función del medio utilizado.

- Entrenamiento con peso libre (Rack): Hace referencia a un entrenamiento de fuerza resistencia en el ejercicio de sentadilla y utilizando peso libre (Singularwod®, Estructura, barra y discos de competición, Spain) (Figura 6) como medio de entrenamiento. Asimismo, esta metodología consistió en 3 series de 15 repeticiones con 1 minuto de descanso entre cada serie al 70% 1RM. Además, en los descansos entre series se dejó la barra en el Rack para completar los descansos y el evaluador o ayudante, acompañó al sujeto tanto para sacar como para dejar la barra en el Rack. Referente a la velocidad del movimiento, fue máxima en la acción concéntrica (1 segundo) y controlada en la acción excéntrica (3 segundos) medidas por el evaluador con un reloj o cronómetro de pared y con una angulación de 90° en la flexión de rodillas colocándole por detrás a cada sujeto, un banco a la altura óptima según su estatura. Con respecto a las ayudas, el evaluador o ayudante se sitúa detrás del sujeto sin llegar a tocar el tronco y acompañándole en el movimiento de cada repetición. En el caso de que el sujeto precisará de ayuda por no poder completar la repetición, el evaluador o ayudante ayudará por detrás del tronco ayudando a levantar el peso. Al igual que en el estudio anterior, en cada repetición, el investigador o ayudante, daba feedback constante al sujeto, animándole para ayudar a completar las repeticiones al nivel establecido.



Figura 6. *Singularwod®*, Estructura, barra y discos de competición,

- Entrenamiento isoinercial (Yoyo Squat): Hace referencia a la misma metodología que el entrenamiento con peso libre (Rack), realizando 3 series de 15 repeticiones con 1 minuto de descanso entre cada serie pero ahora utilizando una máquina isoinercial (Exxcentric®, Yoyo Squat Kbox 4 Pro System, Sweden) (Figura 7) con un disco de inercia de 0,050 kg*m². En los descansos entre cada serie, el sujeto permaneció en bipedestación con el cable enganchado al chaleco sin tensión. En relación a la velocidad del movimiento, fue máxima en la acción concéntrica (1 segundo) y controlada en la acción excéntrica (3 segundos) medidas por el evaluador con un reloj o cronómetro de pared y con una angulación de 90° en la flexión de rodillas colocándole por detrás a cada sujeto un banco a la altura óptima según su estatura. Con respecto a las ayudas, el evaluador o ayudante se sitúa detrás del sujeto sin llegar a tocar el tronco y acompañándole en el movimiento de cada repetición. En el caso de que el sujeto precisará de ayuda por no poder completar la repetición, el evaluador le ayudará por detrás del tronco ayudando a levantar el peso. Al igual que en el protocolo anterior, en cada repetición, el investigador o ayudante, daba feedback constante al sujeto, animándole para ayudar a completar las repeticiones al nivel establecido.



Figura 7. *Exxcentric®*, *Yoyo Squat Kbox 4 Pro System*, Sweden.

3.3. PARTICIPANTES.

En la presente Tesis Doctoral, hemos planteado dos estudios diferentes que darán respuesta a los objetivos marcados. En ambos estudios, como criterios de inclusión, los sujetos debían tener una experiencia de al menos 5 años en el entrenamiento con cargas, ser capaces de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

levantar el 100% de su peso corporal en sentadillas, no presentar lesiones músculo-esqueléticas, estar libre de sustancias estimulantes y dopantes y realizar mínimo 3 entrenamientos de fuerza semanales.

De igual modo, a todos los participantes, se les explicaron los objetivos, la normativa y protocolos de la investigación, firmando cada uno de ellos, un documento de consentimiento (Anexos 1-2) comprometiéndose a realizar y respetar el proceso de las mediciones. Este estudio, se desarrolló respetando los principios establecidos por la declaración de Helsinki y fue aprobado por el comité Bioético de la Universidad de Extremadura (España). A continuación, vamos a explicar por separado como se han organizado los participantes en cada uno de los estudios planteados.

3.3.1. Estudio 1:

En este estudio, participaron voluntariamente 16 sujetos varones entrenados ($N = 16$) con una edad comprendida de 29.13 ± 4.03 años. En la Tabla 4, se muestra información general de los datos descriptivos de los sujetos:

Tabla 4. Datos descriptivos de la muestra $N = 16$ sujetos (Estudio 1)

Variables	Media \pm DT
Edad (Años)	$29,13 \pm 3,93$
Peso (Kg)	$78,95 \pm 9,09$
Estatura (cm)	$176,63 \pm 4,60$
Masa Muscular (kg)	$63,48 \pm 5,38$
Masa Muscular (%)	$80,70 \pm 3,89$
Masa Grasa (kg)	$12,11 \pm 4,84$
Masa Grasa (%)	$15,01 \pm 4,39$
Masa Ósea (kg)	$3,32 \pm 0,25$
1RM (kg)	$140 \pm 19,19$
70% 1RM (kg)	$98 \pm 13,43$

3.3.2. Estudio 2:

En este estudio, participaron voluntariamente 16 sujetos varones entrenados ($N = 16$) con una edad comprendida de 29.88 ± 3.75 años. En la Tabla 5, se muestra información general de los datos descriptivos de los sujetos:

Tabla 5. Datos descriptivos de la muestra $N = 16$ sujetos (Estudio 2).

Variablen	Media \pm DT
Edad (Años)	$29,88 \pm 3,75$
Peso (Kg)	$80,59 \pm 6,91$
Estatura (cm)	$180,19 \pm 6,88$
Masa Muscular (kg)	$62,76 \pm 4,25$
Masa Muscular (%)	$78,26 \pm 3,55$
Masa Grasa (kg)	$14,13 \pm 4,11$
Masa Grasa (%)	$17,38 \pm 4,26$
Masa Ósea (kg)	$3,33 \pm 0,31$
1RM (kg)	$143,13 \pm 10,78$
70% 1RM (kg)	$100,19 \pm 7,54$

3.4. MEDICIONES EXPERIMENTALES:

A continuación, vamos a exponer el proceso de las mediciones que hemos llevado en ambos estudios para poder conseguir los objetivos propuestos con esta investigación. Toda la intervención, fue llevada a cabo en las instalaciones del centro de preparación física del Club deportivo del Golf del Guadiana de Badajoz y supervisadas y dirigidas por el personal investigador responsable de dicha investigación. Indicar además, que estas valoraciones se realizaron después del protocolo de calentamiento anteriormente descrito, tanto antes como después de cada entrenamiento siguiendo el siguiente orden:

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Medición del dolor muscular (Algómetro): 1 minuto después de la finalización del calentamiento, se realizó a través de un Algómetro digital (Algómetro digital FPI®, Wagner Force One Fdix, EEUU), (Figura 8) una presión progresiva y gradual en el centro de la musculatura del cuádriceps, en la que el sujeto partía a 90° de flexión de rodillas y con ello, comprobar la tolerancia al dolor del sujeto, llevándose a cabo antes y después del protocolo de entrenamiento.



Figura 8. Algómetro digital (FPI®, Wagner Force One Fdix, EEUU).

- Test de saltos verticales (SJ y CMJ): Fueron realizados 30 segundos (medidos por el investigador por un cronómetro de pared) después de la medición del dolor. Estos test siguieron la técnica descrita por Tous (1999) para los saltos verticales y para ello, se utilizó una plataforma de contacto (Chronojump®, DIN A2, Spain) (Figura 9). El test consistió en la realización de 3 SJ, seguidos de 3 CMJ, quedándonos con el mejor de cada uno de ellos y con un descanso de 15 segundos entre cada salto. Las variables obtenidas hacen referencia al tiempo de vuelo, altura del salto, potencia y velocidad. Referente a la técnica de SJ, el sujeto partirá con los dos pies en contacto con el suelo, con las dos manos en las caderas y con una flexión de rodillas de 90° durante 4 segundos, para finalmente realizar el salto con una extensión completa de todas las articulaciones sin la ayuda de los brazos. Con respecto a CMJ, es igual que SJ con la diferencia que el sujeto parte en bipedestación y no en flexión de rodillas. Los datos, se obtuvieron a través del software Chronojump (Versión 1.7.1.). Estos

test se realizaron 2 minutos antes del inicio de los entrenamientos, a los 15 segundos de finalizarlo e inmediatamente al finalizar todo el protocolo de entrenamiento.

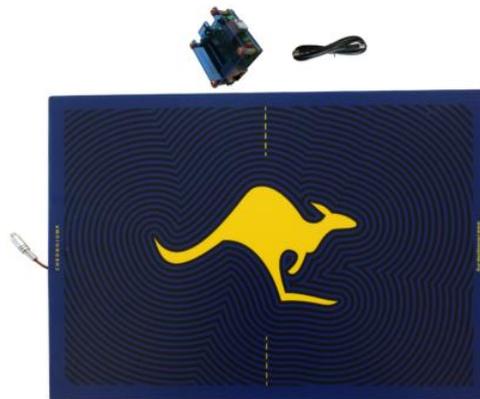


Figura 9. *Plataforma de contacto (Chronojump®, DIN A2, Spain).*

- Fuerza máxima isométrica (Dinamometría): Se realizó a los 30 segundos siguientes a la finalización de las mediciones de los saltos verticales, a través de un dinamómetro Holtain®, Back D, (UK) (Figura 10), consistente en realizar una fuerza máxima de tracción a una cadena por medio de la extensión de piernas. Para ello, el sujeto se coloca en posición baja de peso muerto con las rodillas flexionadas (angulación de 120°) y los brazos siempre estirados y las manos con los agarres. A la señal del evaluador, el sujeto realizó una extensión de piernas con todas sus fuerzas. Esta prueba se realizará 2 veces y se cogerá el mejor de los dos intentos.



Figura 10. *Dinamómetro Holtain®, Back D, (UK).*

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Frecuencia cardíaca (FC): Un minuto después de la última medición previa, comienza el entrenamiento que coincide con la primera valoración de la FC inicial. El sujeto dispondrá de un pulsómetro (Polar®, RS800cx, Finland) (Figura 11) para medir la FC durante toda la prueba. Se tomaron varias mediciones de la FC en distintos momentos del proceso. Éstos fueron la FC inicial justo antes de iniciar el entrenamiento (inmediatamente antes de comenzar la primera repetición), y las FC a los 10 segundos después de cada bloque (primer, segundo y tercer bloque) en el estudio 1 y a los 10 segundos después de cada serie (3 series) en el estudio 2.



Figura 11. Pulsómetro (Polar®, RS800cx, Finland).

- Esfuerzo percibido (RPE): El objetivo que se pretende con esta prueba, es identificar el esfuerzo percibido por el sujeto en cada una de los bloques o series. Esta variable fue determinada por la escala subjetiva de esfuerzo percibido OMNI-RES (Robertson et al., 2003) (Figura 12), antes de la prueba, estando los sujetos descansados, e inmediatamente tras la última repetición en cada uno de los bloques de entrenamiento (primer, segundo y tercer bloque) en el estudio 1 y después de la última repetición de cada una de las series del estudio 2. Para ello, antes del inicio de todo el protocolo de la prueba, el evaluador les mostró una escala gráfica de 0 (ausencia de dolor) a 10 (máximo dolor) en la que el sujeto únicamente tuvo que señalar el esfuerzo percibido en cada bloque o serie.

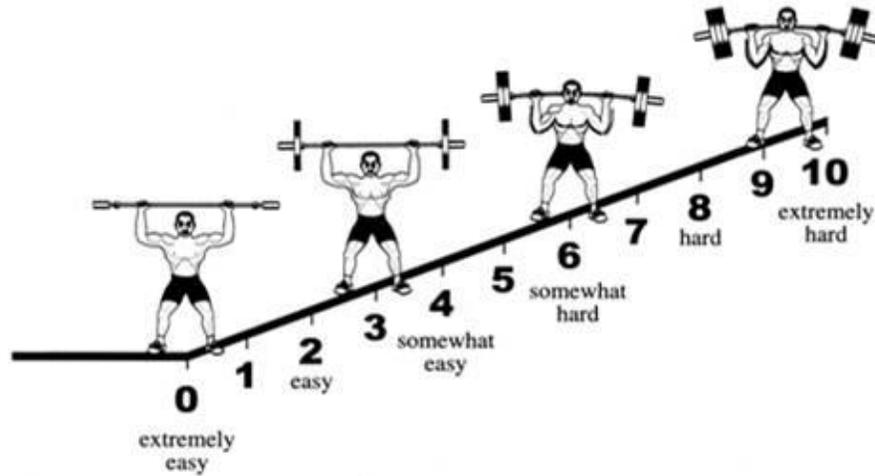


Figura 12. Escala de esfuerzo percibido OMNI-RES. Adaptado de Robertson et al. (2003).

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO:

El análisis estadístico para ambos estudios, ha sido desarrollado por el paquete estadístico SPSS en su versión 20. Para determinar de la utilización de la estadística paramétrica o no paramétrica, se utilizaron las pruebas de Normalidad, Aleatorización y Homocedasticidad. Posteriormente, utilizaremos un análisis inferencial con una prueba ANOVA de Medidas Repetidas para ver las diferencias a nivel Intragrupo y a nivel Intergrupo. El tamaño del efecto (TE), fue calculado para todas las variables dependientes usando el estadístico de Cohen' s d. La magnitud del efecto fue clasificada como trivial (0.25), pequeña (entre 0.25 y 0.50), moderada (entre 0.50 y 1.0) y larga (>1.0). Los valores utilizados en la investigación han sido la media y desviación típica y los criterios utilizados para la significación fueron con un valor de $p < 0.05$.

RESULTADOS



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

4. RESULTADOS.

4.1. ESTUDIO 1:

Análisis Intragrupo:

En las *Tabla 6* y *7*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos por los participantes que iniciaron el protocolo de entrenamiento clúster del ejercicio de sentadillas en el Rack. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y desviación estándar en la tabla. Desde el punto de vista inferencial, se mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) en todas las variables analizadas excepto en la variable de Algómetro.

Tabla 6. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría (Estudio1).

VARIABLES	Rack				
	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	89,06 ± 24,03	90,99 ± 23,28	-1,92	NS	-0.08
SJ (Tiempo de vuelo)	0,49 ± 0.01	0.48 ± 0.02	0,01	P = 0,001	0.65
SJ (Altura)	30,37 ± 2,03	28,75 ± 2,88	1,62	P = 0,001	0.67
SJ (Potencia)	943,55 ± 115,05	918,40 ± 127,48	25,15	P = 0,001	0.21
SJ (Velocidad)	2,43 ± 0,08	2,37 ± 0,11	0,06	P = 0,001	0.64
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,51 ± 0,02	0,49 ± 0,03	0,01	P = 0,001	0.81
CMJ (Altura)	32,59 ± 3,62	30,73 ± 4,43	1,86	P = 0,001	0.47
CMJ (Potencia)	978,80 ± 133,06	950,10 ± 154,72	28,70	P = 0,001	0.21
CMJ (Velocidad)	2,53 ± 0,13	2,45 ± 0,17	0,08	P = 0,001	0.55
Dinamometría	45,40 ± 8,96	38 ± 8,42	7,40	P = 0,001	0.88

$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

NS: No hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Tabla 7. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de RPE y FC (Estudio 1).

VARIABLES	Rack					Tiempo (p)	Cohen's d
	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3			
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,75 ± 0,68	8,56 ± 0,62	9,25 ± 0,68		p = 0,000	-19.87
FC 10''	96,87 ± 18,15	147,56 ± 20,72	153,25 ± 21,19	159,62 ± 18,93		p = 0,000	-3.49

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

En las *Tabla 8* y *9*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos con el protocolo de entrenamiento Clúster en el ejercicio de sentadillas en el Multipower. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y desviación estándar en la tabla. Desde el punto de vista inferencial, también se mostró una disminución significativa ($p<0.05$) en todas las variables analizadas excepto en la variable de Algómetro.

Tabla 8. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.

VARIABLES	Multipower				
	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	80,51 ± 18,53	82.86 ± 21,03	-2,35	NS	-0.12
SJ (Tiempo de vuelo)	0,49 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,01	P = 0,001	1.03
SJ (Altura)	30,19 ± 2,94	28,23 ± 3,22	1,95	P = 0,001	0.66
SJ (Potencia)	940,43 ± 120,74	909,35 ± 125,28	31,07	P = 0,001	0.26
SJ (Velocidad)	2,43 ± 0,11	2,35 ± 0,13	0,08	P = 0,001	0.69
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,52 ± 0,02	0,50 ± 0,02	0,02	P = 0,001	1.03
CMJ (Altura)	33,35 ± 3,16	31,62 ± 3,66	1,72	P = 0,001	0.52
CMJ (Potencia)	988,48 ± 130,08	962,23 ± 133,58	26,25	P = 0,001	0.21
CMJ (Velocidad)	2,55 ± 0,11	2,48 ± 0,14	0,06	P = 0,001	0.57

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Dinamometría	45,78 ± 11,04	38,09 ± 9,47	7,68	P = 0,001	0.77
--------------	---------------	--------------	------	-----------	------

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

NS: No hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Tabla 9. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower) de las variables de RPE y FC.

Multipower

VARIABLES	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Tiempo (p)	Cohen's d
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,62 ± 0,80	8,50 ± 0,89	8,93 ± 0,92	p = 0,000	-14.18
FC 10''	96,43 ± 18,24	139,68 ± 23,40	149,12 ± 20,20	147,75 ± 24,56	p = 0,000	-2.45

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

En las *Tabla 10* y *11*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos con el protocolo de entrenamiento Clúster en el ejercicio de sentadillas en el Rack en combinación con EMS. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y desviación estándar en la tabla.

Desde el punto de vista inferencial, también se mostró una disminución significativa (p<0.05) en todas las variables analizadas excepto en la variable de Algómetro.

Tabla 10. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack + Compex) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.

Rack + Compex					
VARIABLES	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	102,01 ± 71,48	82,13 ± 27,10	19,87	NS	0.38
SJ (Tiempo de vuelo)	0,49 ± 0,02	0,48 ± 0,01	0,01	P = 0,000	0.65
SJ (Altura)	30,64 ± 2,53	28,93 ± 2,26	1,71	P = 0,000	0.74
SJ (Potencia)	945,70 ± 97,25	921,60 ± 123,37	24,09	P = 0,000	0.22
SJ (Velocidad)	2,45 ± 0,10	2,38 ± 0,09	0,06	P = 0,000	0.76
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,51 ± 0,19	0,50 ± 0,02	0,01	P = 0,000	0.08
CMJ (Altura)	32,95 ± 2,46	30,85 ± 2,73	2,09	P = 0,000	0.83
CMJ (Potencia)	981,75 ± 109,25	951,06 ± 122,10	30,68	P = 0,000	0.27
CMJ (Velocidad)	2,54 ± 0,09	2,45 ± 0,10	0,08	P = 0,000	0.98
Dinamometría	44,75 ± 8,86	35,90 ± 8,96	8,84	P = 0,000	1.03

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

NS: No hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Tabla 11. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack + Compex) de las variables de RPE y FC.

Rack + COMPEX

VARIABLES	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Tiempo (p)	Cohen's d
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,75 ± 0,57	8,62 ± 0,50	9,43 ± 0,51	p = 0,000	-27.01
FC 10''	97,00 ± 8,62	144,12 ± 22,29	153,43 ± 20,66	156,81 ± 18,93	p = 0,000	-4.20

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

En las *Tabla 12* y *13*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos con el protocolo de entrenamiento Clúster en el ejercicio de sentadillas en el Multipower en combinación con EMS. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

desviación estándar en la tabla. Desde el punto de vista inferencial, también se mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) en todas las variables analizadas excepto en la variable de Algómetro.

Tabla 12. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower + Compex) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.

Multipower + Compex					
VARIABLES	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	86,74 ± 20,83	84,18 ± 18,20	2,56	NS	0.14
SJ (Tiempo de vuelo)	0,49 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,01	P = 0,000	1.03
SJ (Altura)	29,75 ± 2,73	27,61 ± 3,44	2,14	P = 0,000	0.71
SJ (Potencia)	934,07 ± 122,26	899,46 ± 125,06	34,60	P = 0,000	0.29
SJ (Velocidad)	2,41 ± 0,11	2,32 ± 0,14	0,09	P = 0,000	0.74
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,51 ± 0,03	0,49 ± 0,03	0,01	P = 0,000	0.69
CMJ (Altura)	32,45 ± 3,96	30,59 ± 4,06	1,85	P = 0,000	0.48
CMJ (Potencia)	974,99 ± 137,84	946,93 ± 138,96	28,05	P = 0,000	0.21
CMJ (Velocidad)	2,51 ± 0,15	2,44 ± 0,16	0,07	P = 0,000	0.47
Dinamometría	44,12 ± 9,58	38,33 ± 8,86	5,79	P = 0,000	0.65

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

NS: No hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Tabla 13. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Multipower + Compex) de las variables de RPE y FC.

Multipower + COMPEX						
VARIABLES	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Tiempo (p)	Cohen's d
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,62 ± 0,88	8,56, ± 0,81	9,06 ± 0,77	p = 0,000	-17.19
FC 10''	97,25 ± 9,16	145,00 ± 25,60	152,25 ± 20,47	153,50 ± 21,59	p = 0,000	-3.81

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

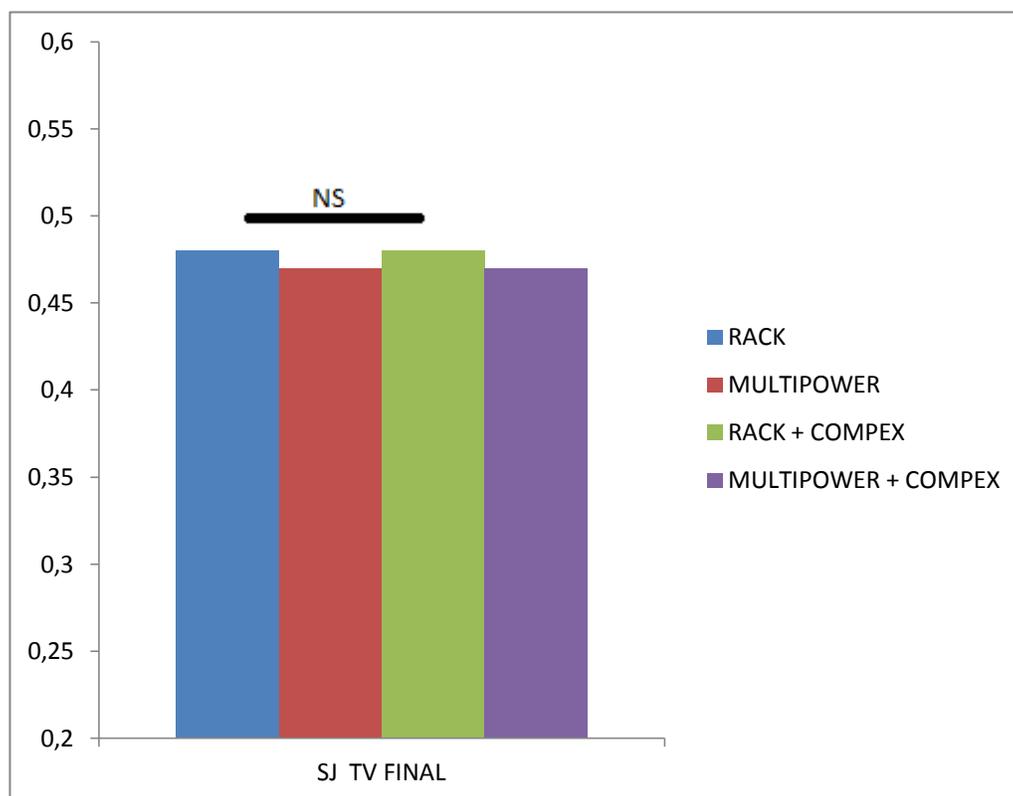
Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis Intergrupo:

A continuación, se indican en las siguientes figuras, los resultados obtenidos a nivel Intergrupo, mostrando la significación de cada una de las variables entre los diferentes grupos o medio de entrenamiento y cada una de las variables analizadas.

En la Figura 13, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de tiempo de vuelo final (TV) de la variable de salto "Squat Jump" (SJ) entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 13. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Complex y Multipower + Complex) en valores finales de Tiempo de vuelo en SJ.*

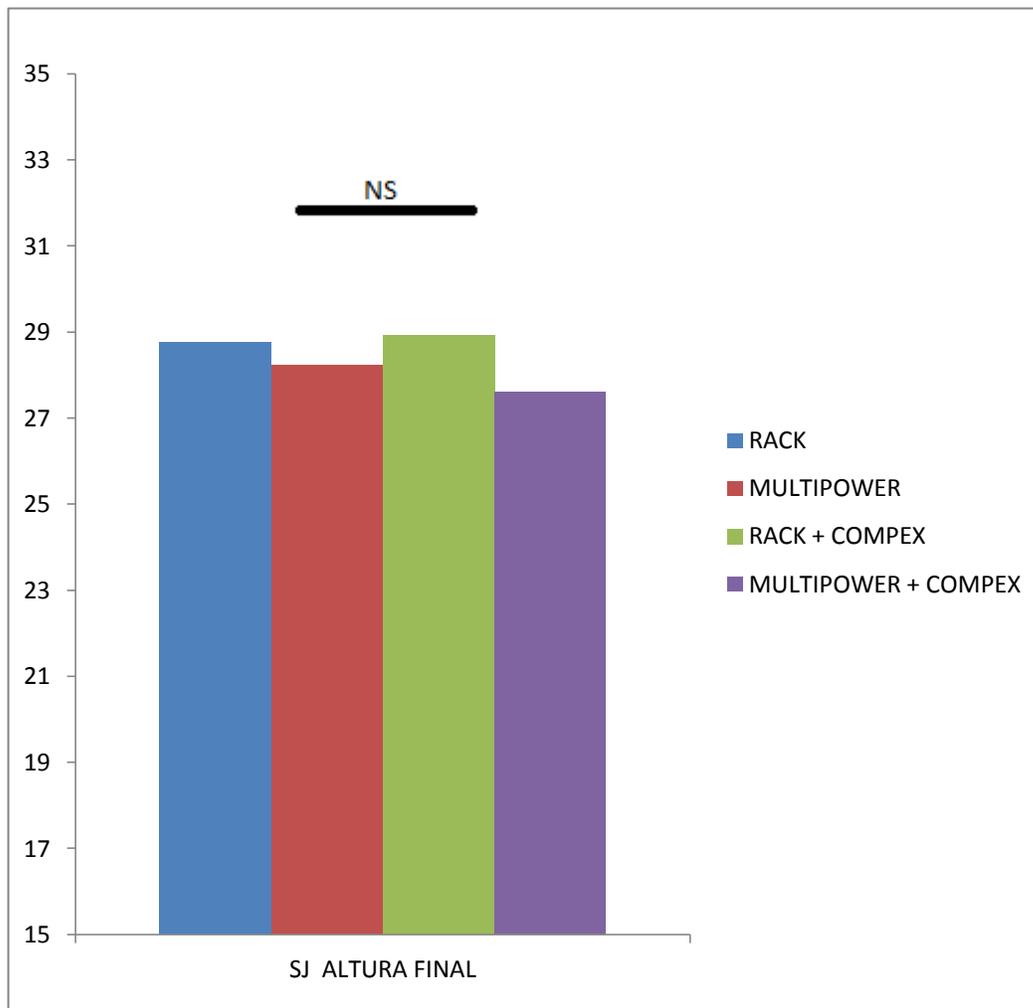


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 14, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de altura final de vuelo de la variable de salto "Squat Jump" (SJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 14. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Altura en SJ.*

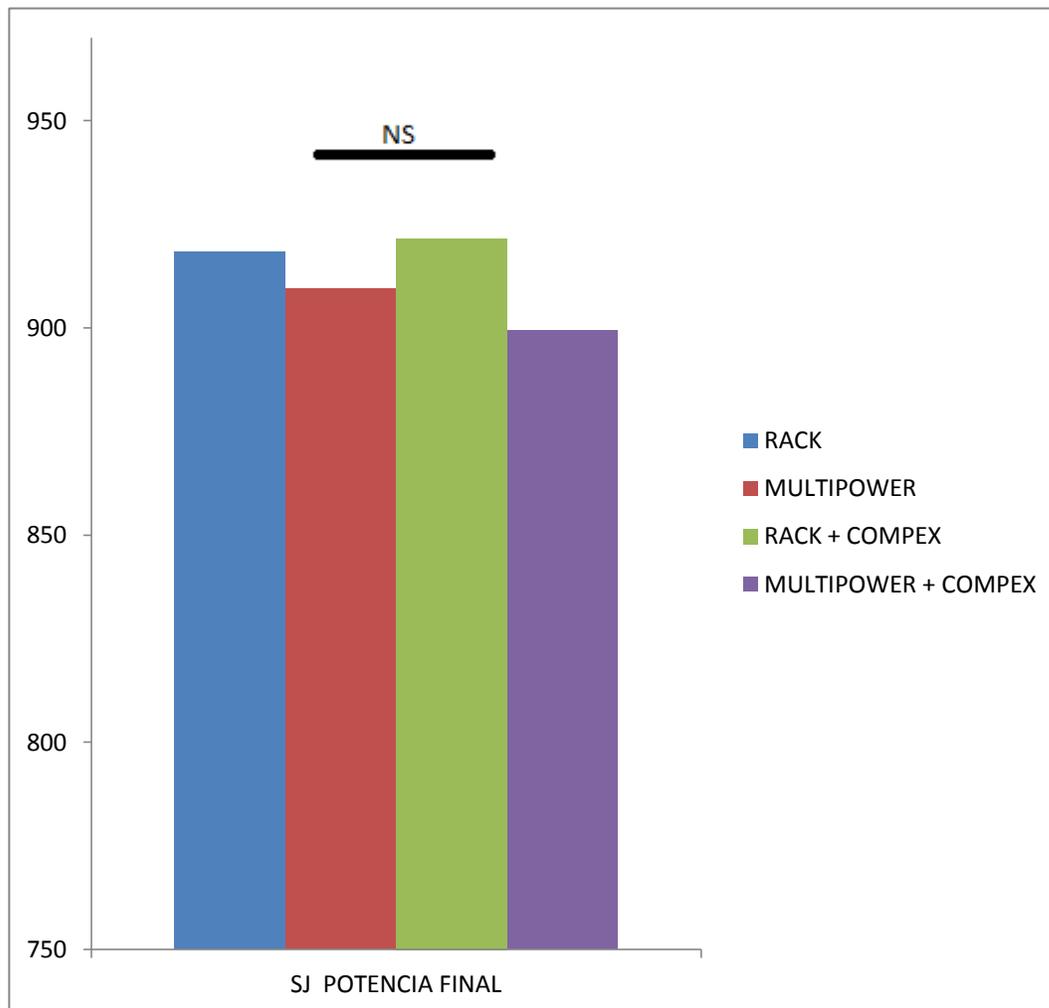


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 15, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de potencia final de vuelo de la variable de salto ‘‘Squat Jump’’ (SJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 15. Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Complex y Multipower + Complex) en valores finales de Potencia en SJ.

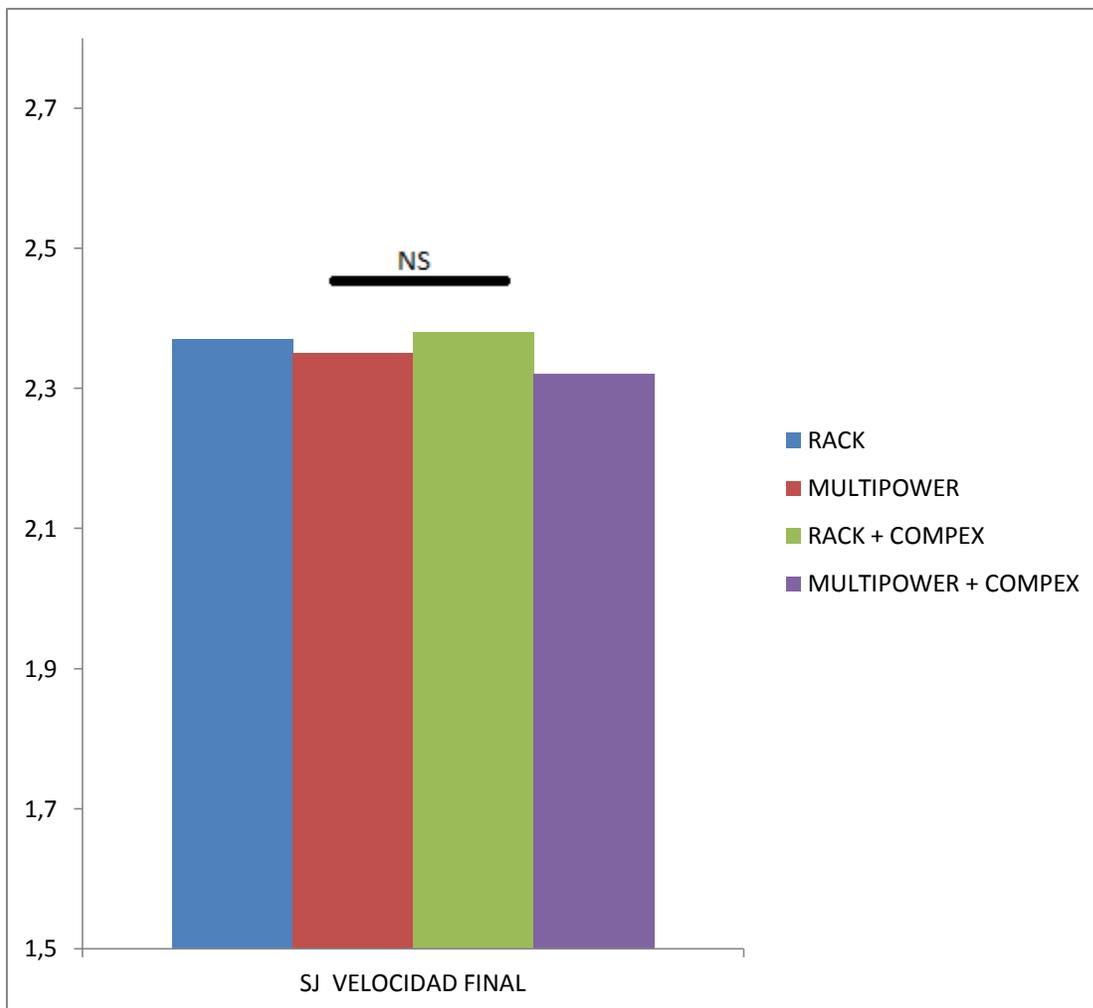


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 16, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de velocidad final de vuelo de la variable de salto "Squat Jump" (SJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 16. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Complex y Multipower + Complex) en valores finales de Velocidad en SJ.*

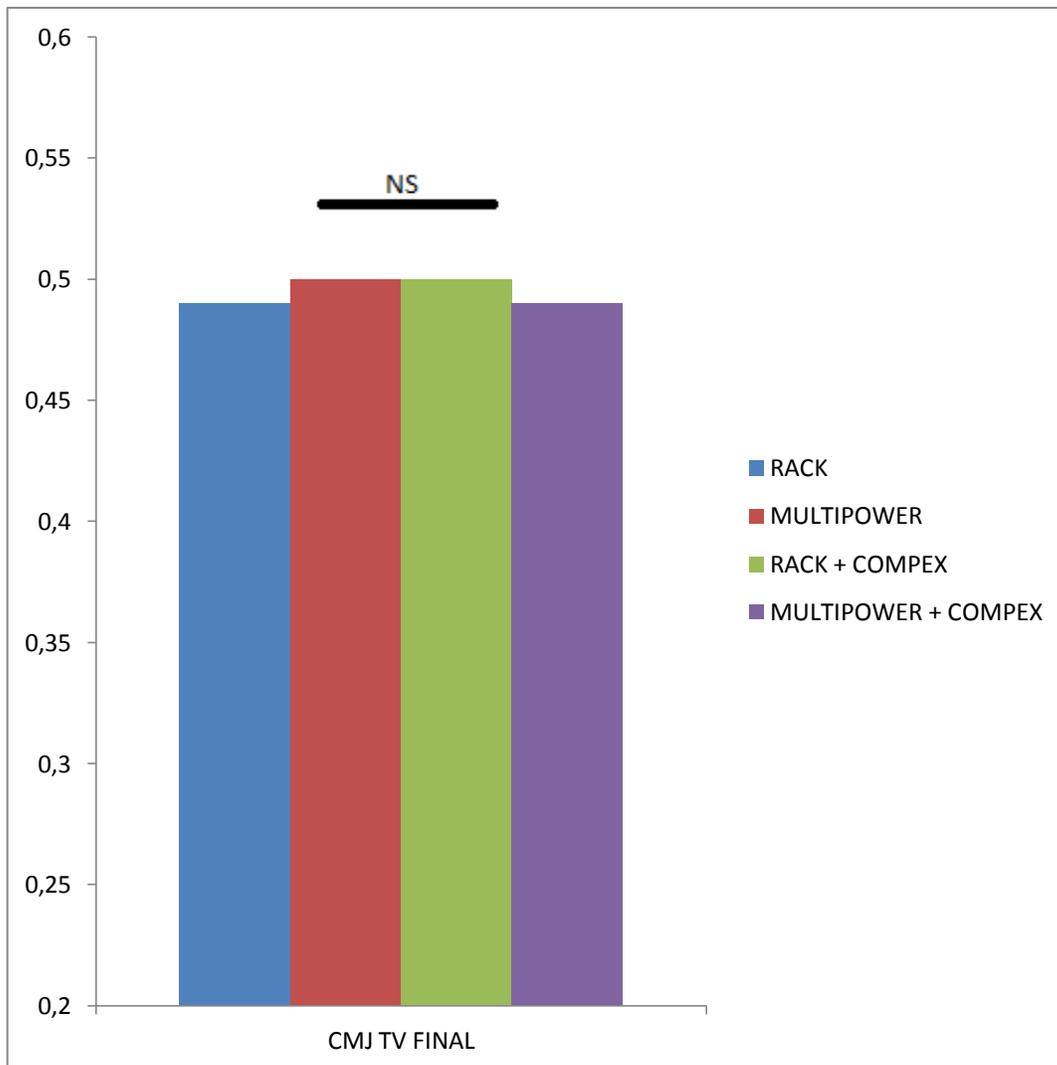


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 17, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de tiempo de vuelo final (TV) de la variable de salto “Countermovement Jump” (CMJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 17. Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Complex y Multipower + Complex) en valores finales de Tiempo de vuelo en CMJ.

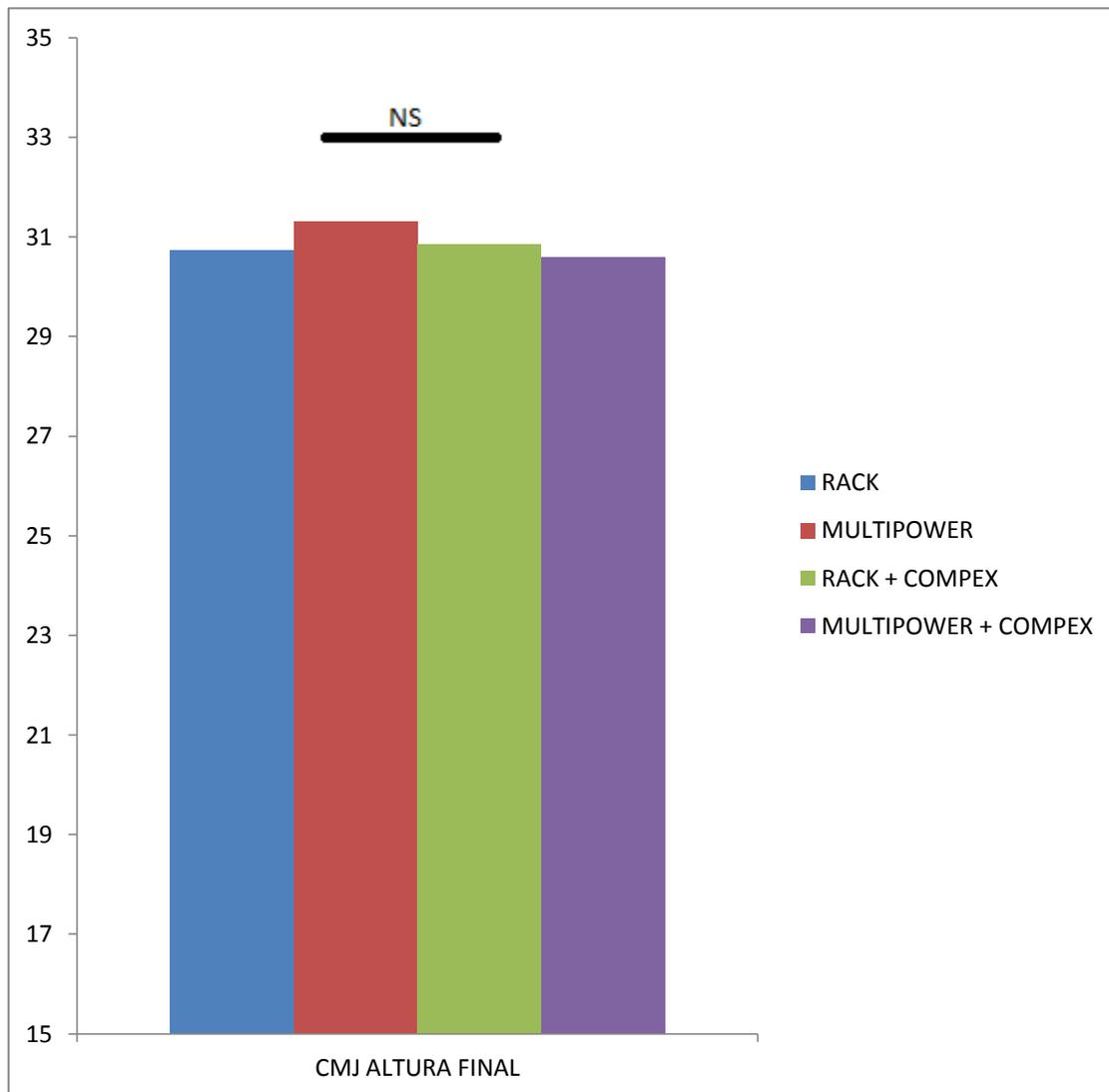


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 18, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de altura final de vuelo de la variable de salto "Countermovement Jump" (CMJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 18. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Altura en CMJ.*

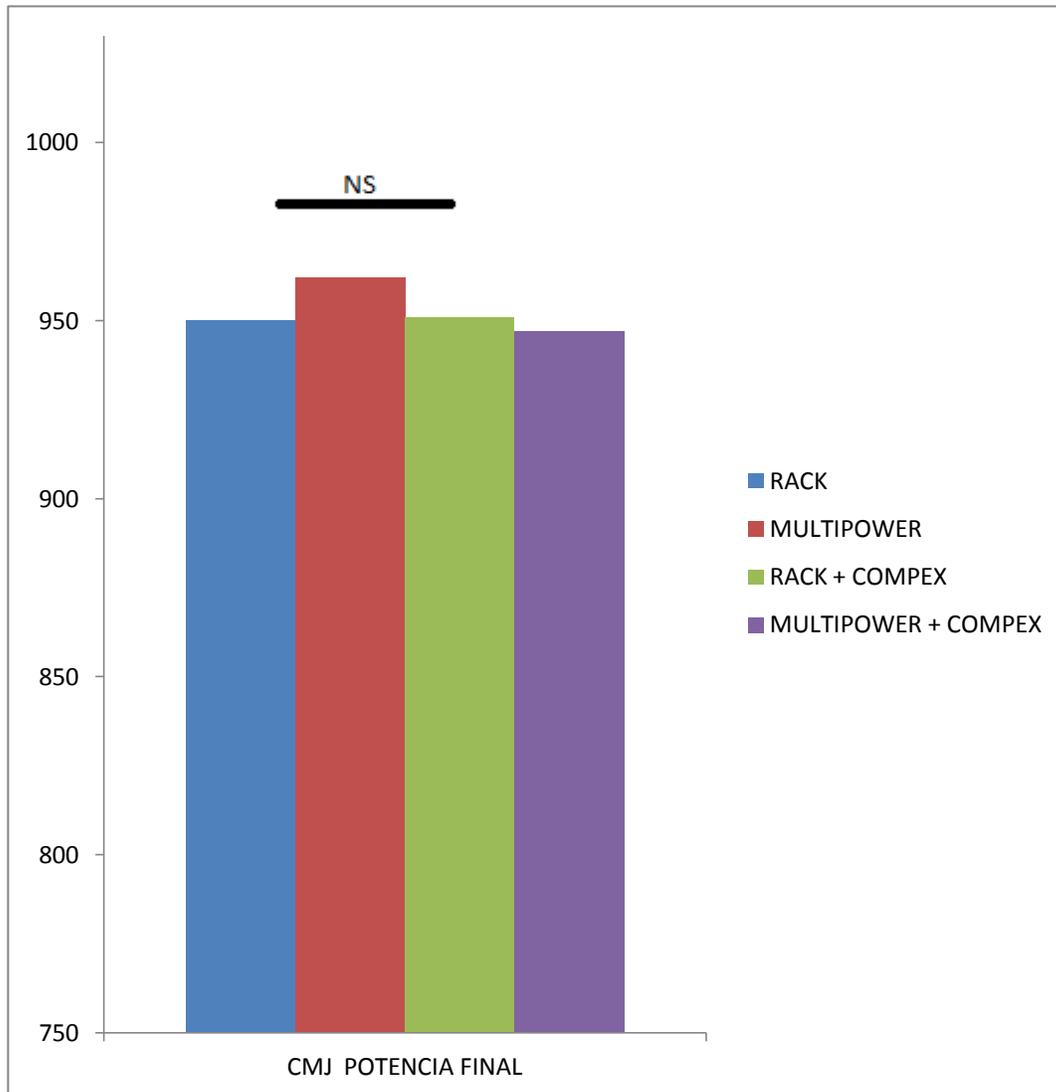


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 19, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de potencia final de vuelo de la variable de salto ‘‘Countermovement Jump’’ (CMJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 19. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Potencia en CMJ.*

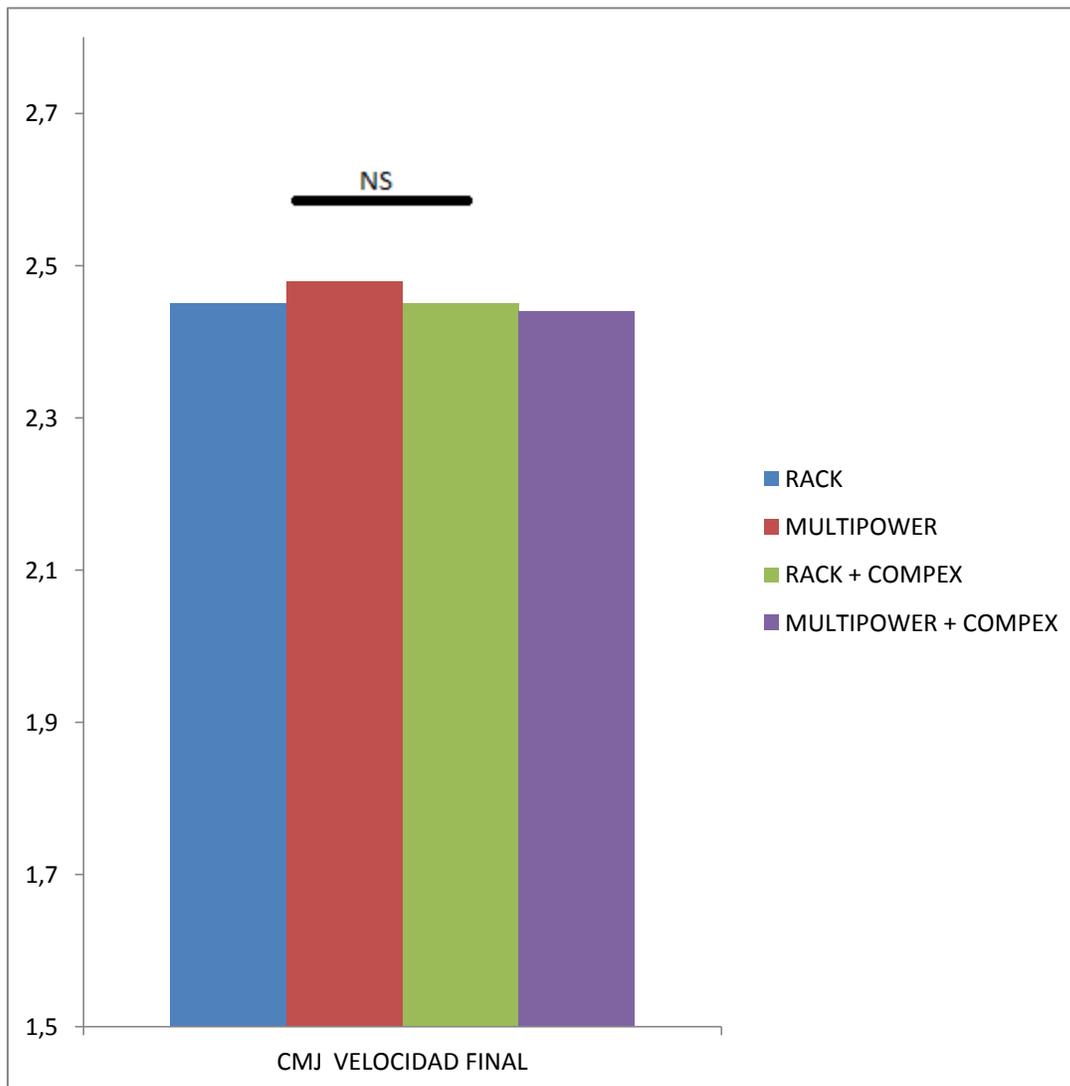


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 20, se ha observado que no existen diferencias significativas en la categoría de velocidad final de vuelo de la variable de salto “Countermovement Jump” (CMJ), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 20. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Velocidad en CMJ.*

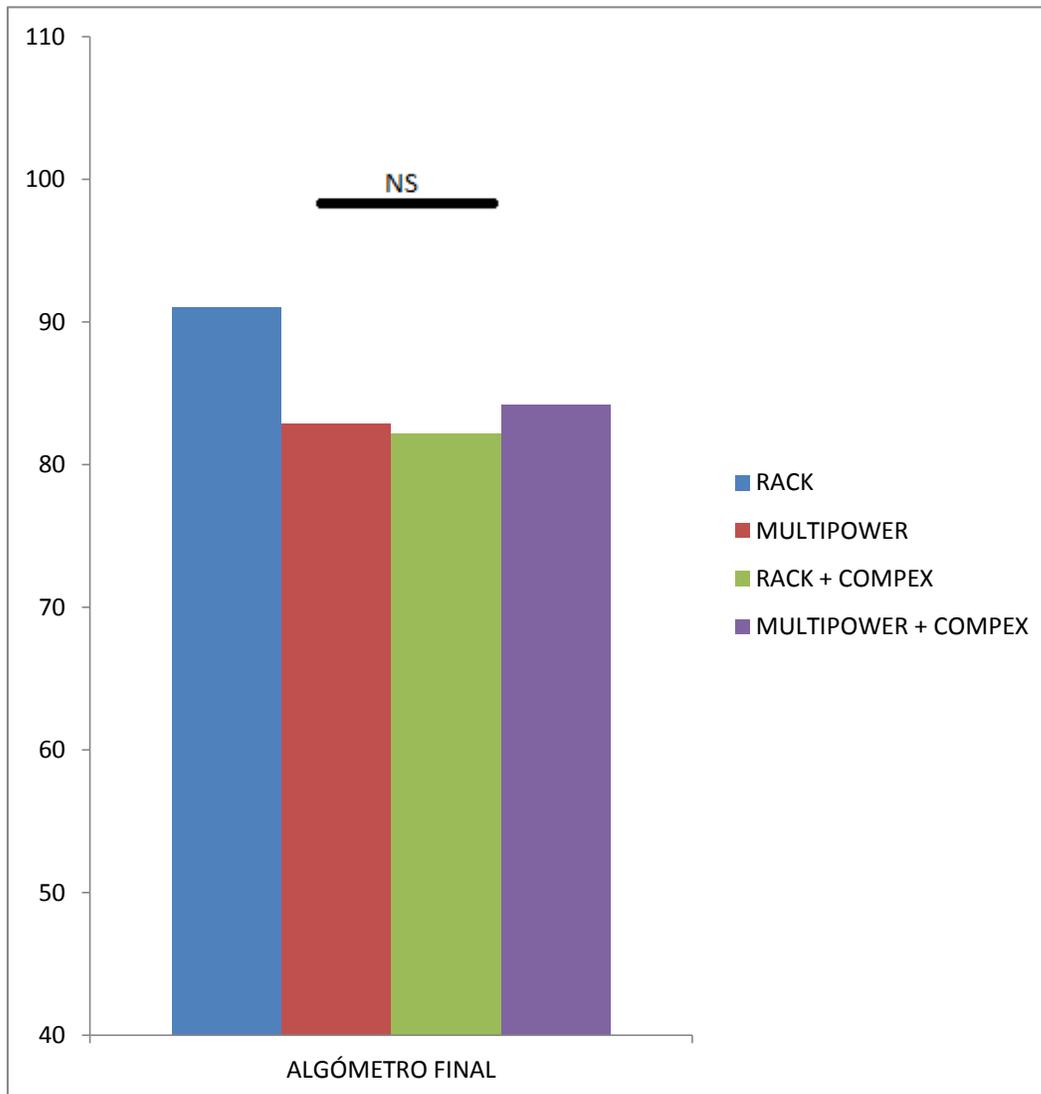


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 21, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de Algómetro final, entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 21. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de Algómetro.*

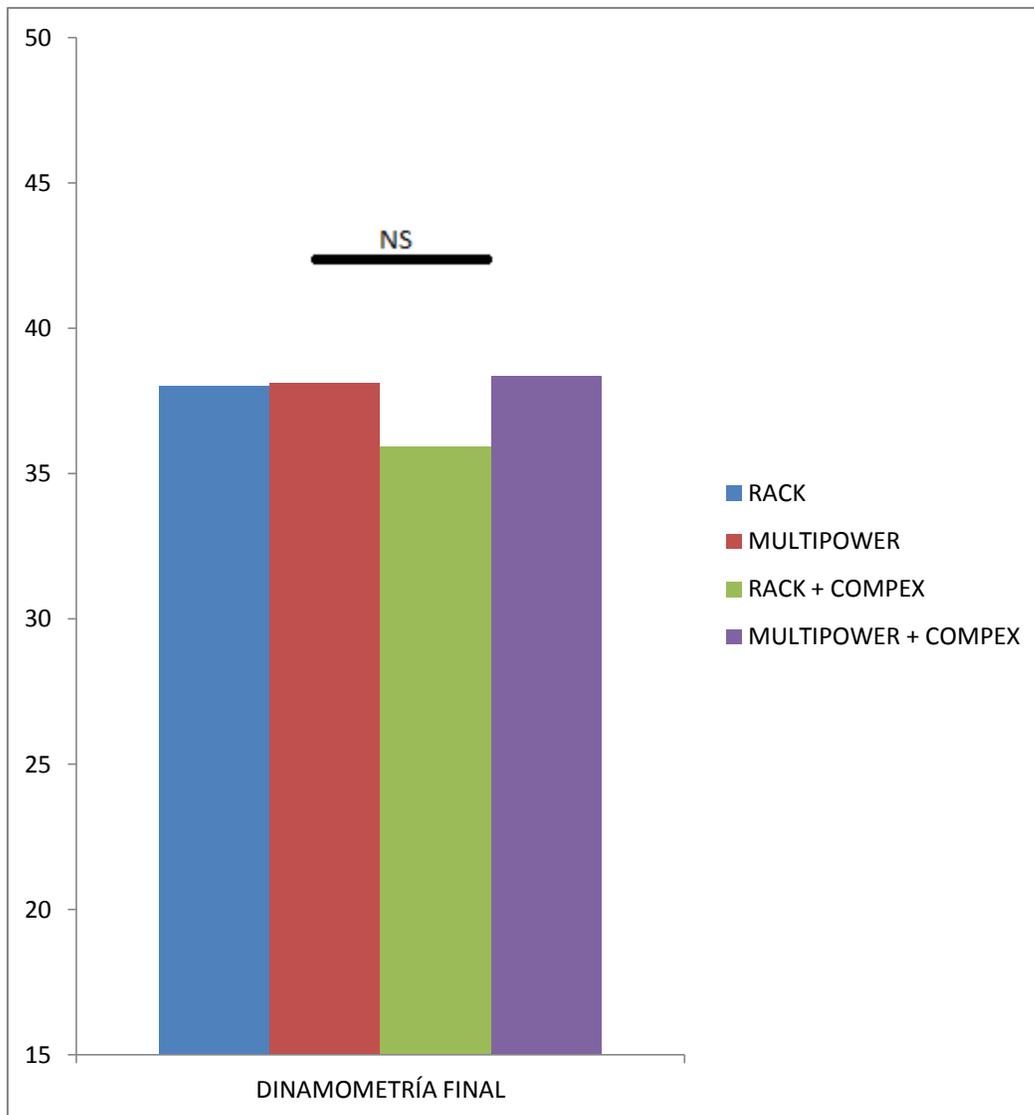


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 22, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de Dinamometría final, entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 22. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Complex y Multipower + Complex) en valores finales de Dinamometría.*

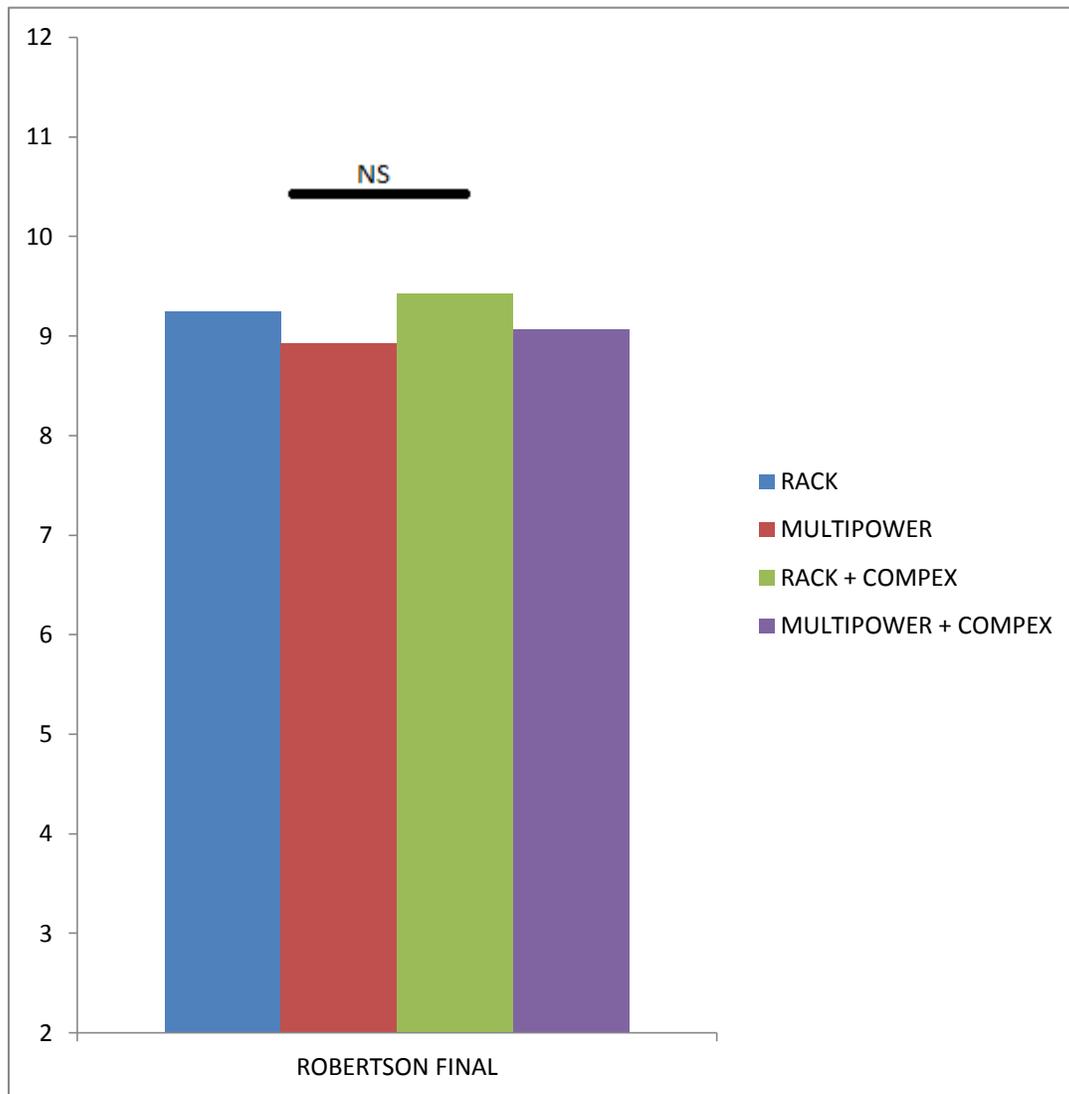


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 23, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de RPE (Robertson final), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 23. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex, Multipower + Compex) en valores finales de RPE.*

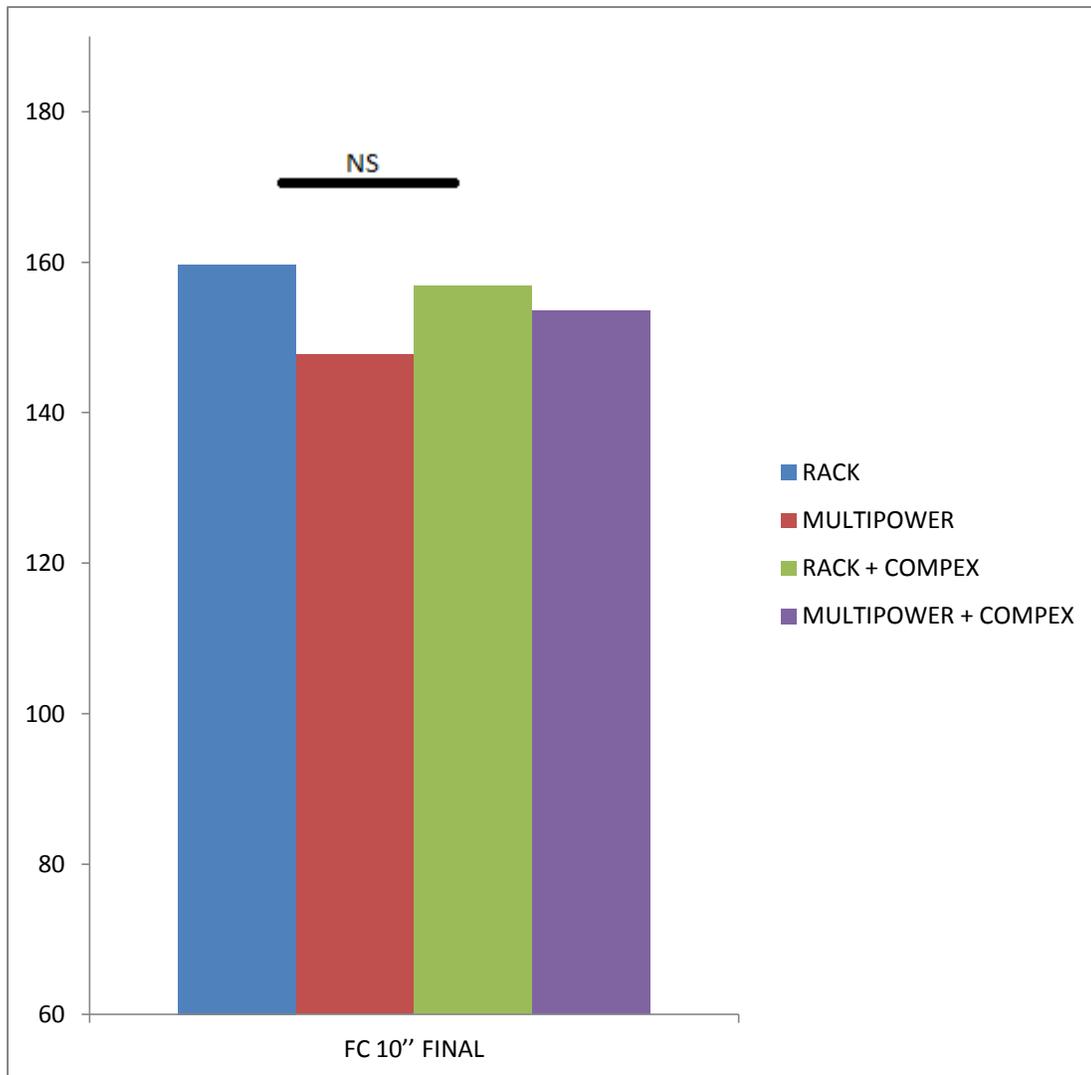


NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 24, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de FC a los 10 segundos de la prueba (FC 10''), entre los 4 medios de entrenamiento.

Figura 24. *Análisis Intergrupo (Rack, Multipower, Rack + Compex y Multipower + Compex) en valores finales de FC.*



NS: No hay diferencias significativas entre los grupos.

4.2. ESTUDIO 2:

Análisis Intragrupo:

En las *Tabla 14* y *15*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos con el protocolo de entrenamiento de hipertrofia en el ejercicio de sentadillas en el Rack. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y desviación estándar en la tabla.

Desde el punto de vista inferencial, se mostró una disminución significativa ($p < 0.05$) en todas las variables analizadas.

Tabla 14. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría (Estudio 2).

VARIABLES	Rack				
	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	105,33 ± 14,13	99,17 ± 16,91	6,15	p = 0,006	0.41
SJ (Tiempo de vuelo)	0,50 ± 0,02	0,48 ± 0,02	0,02	p = 0,000	1.03
SJ (Altura)	32,34 ± 3,34	28,51 ± 3,38	3,82	p = 0,000	1.18
SJ (Potencia)	980,08 ± 69,26	933,58 ± 102,91	46,50	p = 0,000	0.55
SJ (Velocidad)	2,51 ± 0,13	2,36 ± 0,14	0,14	p = 0,000	1.15
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,53 ± 0,02	0,50 ± 0,03	0,02	p = 0,000	1.22
CMJ (Altura)	34,81 ± 3,28	31,06 ± 3,78	3,74	p = 0,000	1.09
CMJ (Potencia)	1023,31 ± 66,57	971,38 ± 122,22	51,93	p = 0,000	0.54
CMJ (Velocidad)	2,61 ± 0,12	2,46 ± 0,15	0,14	p = 0,000	1.14
Dinamometría	56,81 ± 15,32	43,28 ± 14,64	13,53	p = 0,000	0.93

$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Tabla 15. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (Rack) de las variables de RPE y FC (Estudio 2).

VARIABLES	Rack					P	Cohen's d
	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3			
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,81 ± 0,75	8,87 ± 0,53	9,53 ± 0,61		p = 0,000	-22.82
FC (10'')	94,06 ± 7,64	120,93 ± 12,15	128,43 ± 13,01	136,37 ± 10,37		p = 0,000	-4.80

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

En las *Tabla 16 y 17*, se muestran desde el punto de vista descriptivo, los resultados obtenidos con el protocolo de entrenamiento de hipertrofia en el ejercicio de sentadillas en el Yoyo Squat. Este rendimiento, se cuantificó con la diferencia entre los valores iniciales y finales de cada variable analizada. Los datos se presentan como media y desviación estándar en la tabla. Desde el punto de vista inferencial, se mostró una disminución significativa (p<0.05) en todas las variables analizadas.

Tabla 16. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (YOYO) de las variables de saltos SJ y CMJ, Algómetro y dinamometría.

VARIABLES	YOYO				
	Inicial	Final	Diferencia	P	Cohen's d
Algómetro	109,06 ± 32,07	90,43 ± 14,62	18,63	p = 0,006	0.77
SJ (Tiempo de vuelo)	0,51 ± 0,02	0,45 ± 0,04	0,05	p = 0,000	1.96
SJ (Altura)	32,50 ± 3,12	25,55 ± 4,48	6,95	p = 0,000	1.86
SJ (Potencia)	981,31 ± 103,87	860,15 ± 92,26	121,15	p = 0,000	1.27
SJ (Velocidad)	2,52 ± 0,11	2,23 ± 0,20	0,29	p = 0,000	1.86
CMJ (Tiempo de vuelo)	0,53 ± 0,02	0,47 ± 0,04	0,05	p = 0,000	1.96
CMJ (Altura)	34,87 ± 3,60	28,26 ± 4,53	6,61	p = 0,000	1.67
CMJ (Potencia)	1024,73 ± 105,38	905,14 ± 91,98	119,59	p = 0,000	1.25
CMJ (Velocidad)	2,61 ± 0,13	2,34 ± 0,19	0,26	p = 0,000	1.71
Dinamometría	55,40 ± 15,59	40,21 ± 14,10	15,18	p = 0,000	1.06

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Tabla 17. Análisis descriptivo e inferencial Intragrupo (YOYO) de las variables de RPE y FC.

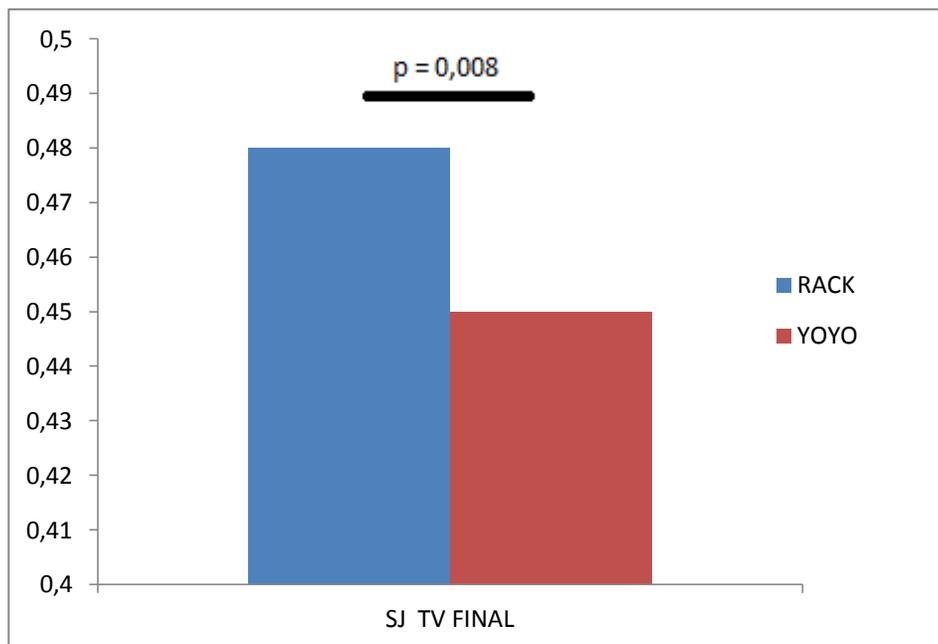
VARIABLES	YOYO				P	Cohen's d
	Inicial	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3		
RPE (Robertson)	0,00 ± 0,00	7,87 ± 0,71	8,87 ± 0,50	9,68 ± 0,44	p = 0,000	-32.13
FC (10'')	91,31 ± 9,33	122,56 ± 13,95	130,56 ± 13,42	137,25 ± 11,46	p = 0,000	-4.54

P<0.05: Si hay diferencias significativas entre los valores iniciales y finales.

Análisis Intergrupo:

A continuación, se indican en las siguientes figuras, los resultados obtenidos a nivel Intergrupo, mostrando la significación de cada una de las variables entre los 2 medios de entrenamiento y cada una de las variables analizadas. En la Figura 25, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de tiempo de vuelo final (TV) de la variable de salto ‘‘Squat Jump’’ (SJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico (p = 0.008).

Figura 25. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Tiempo de vuelo en SJ.

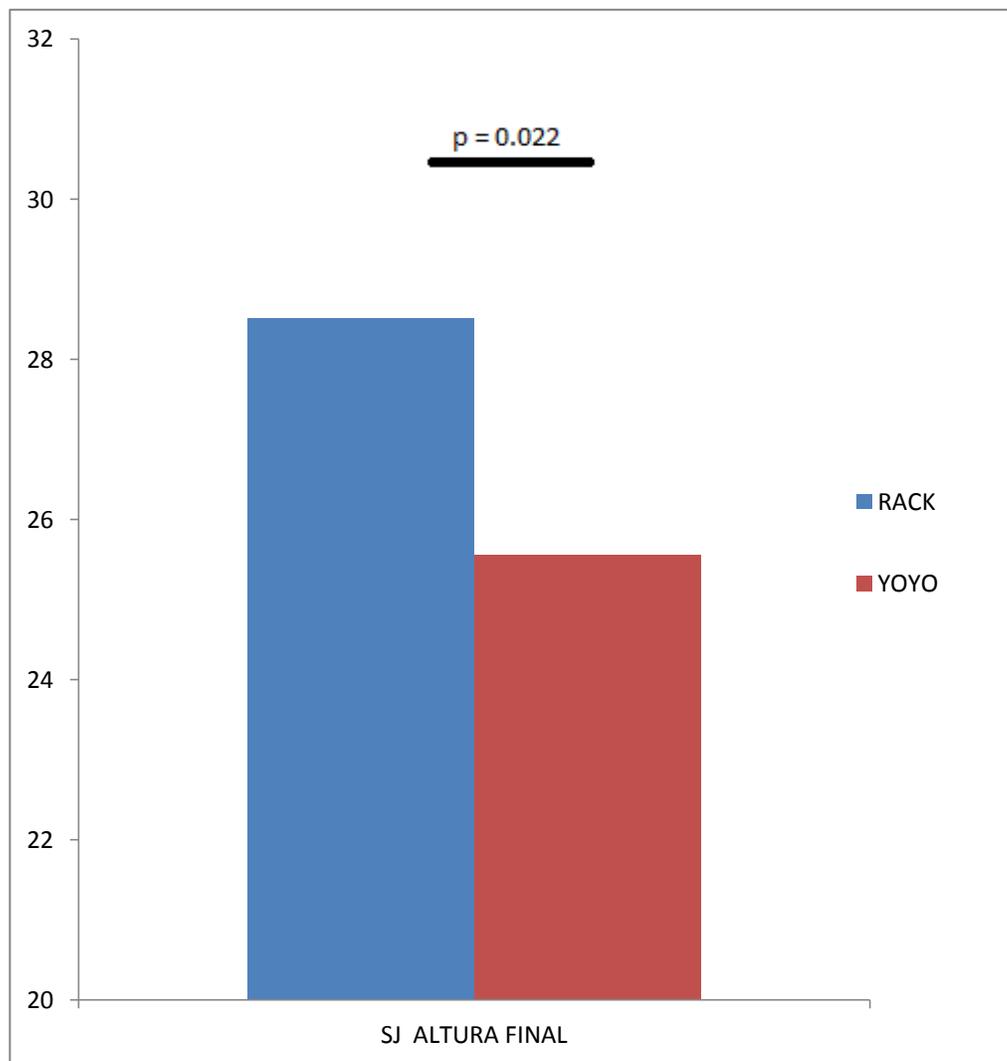


P<0.05: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 26, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de altura final de la variable de salto "Squat Jump" (SJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.022$).

Figura 26. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Altura en SJ.

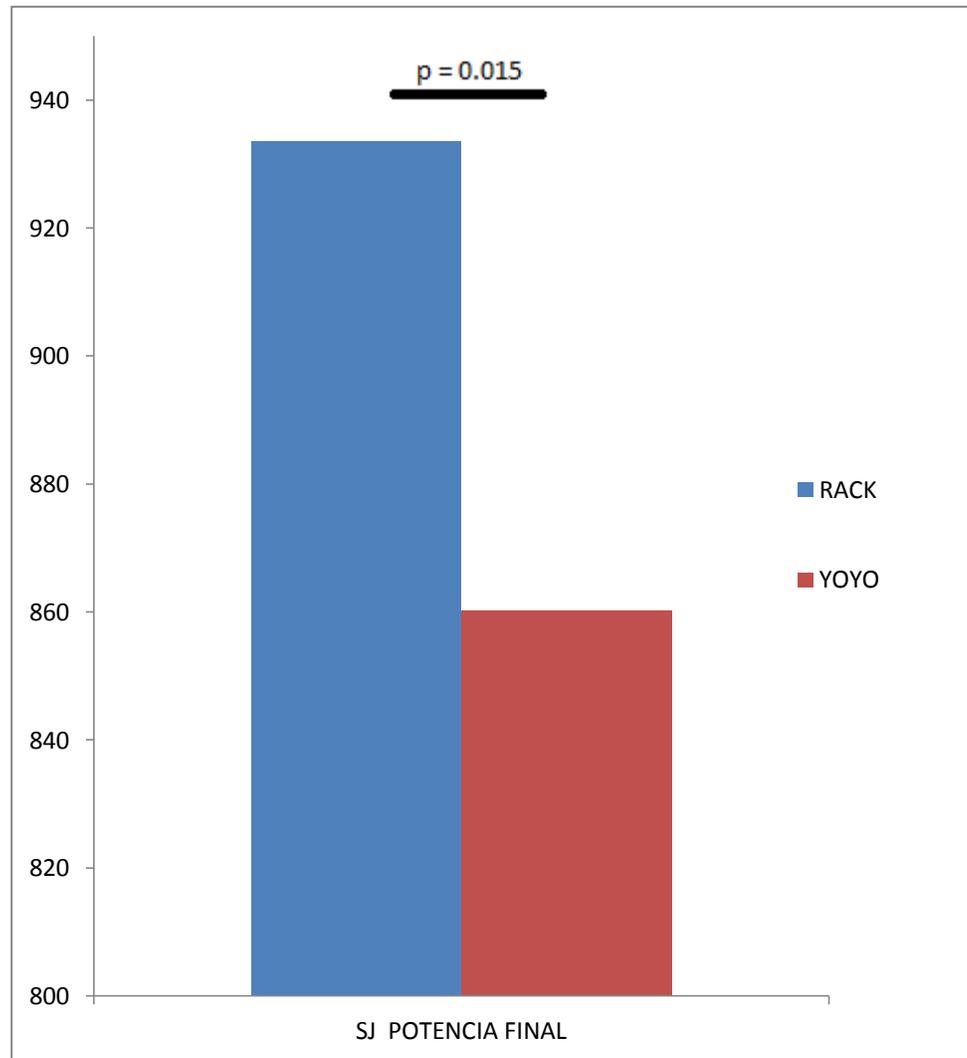


$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 27, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de potencia final de la variable de salto "Squat Jump" (SJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.015$).

Figura 27. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Potencia en SJ.

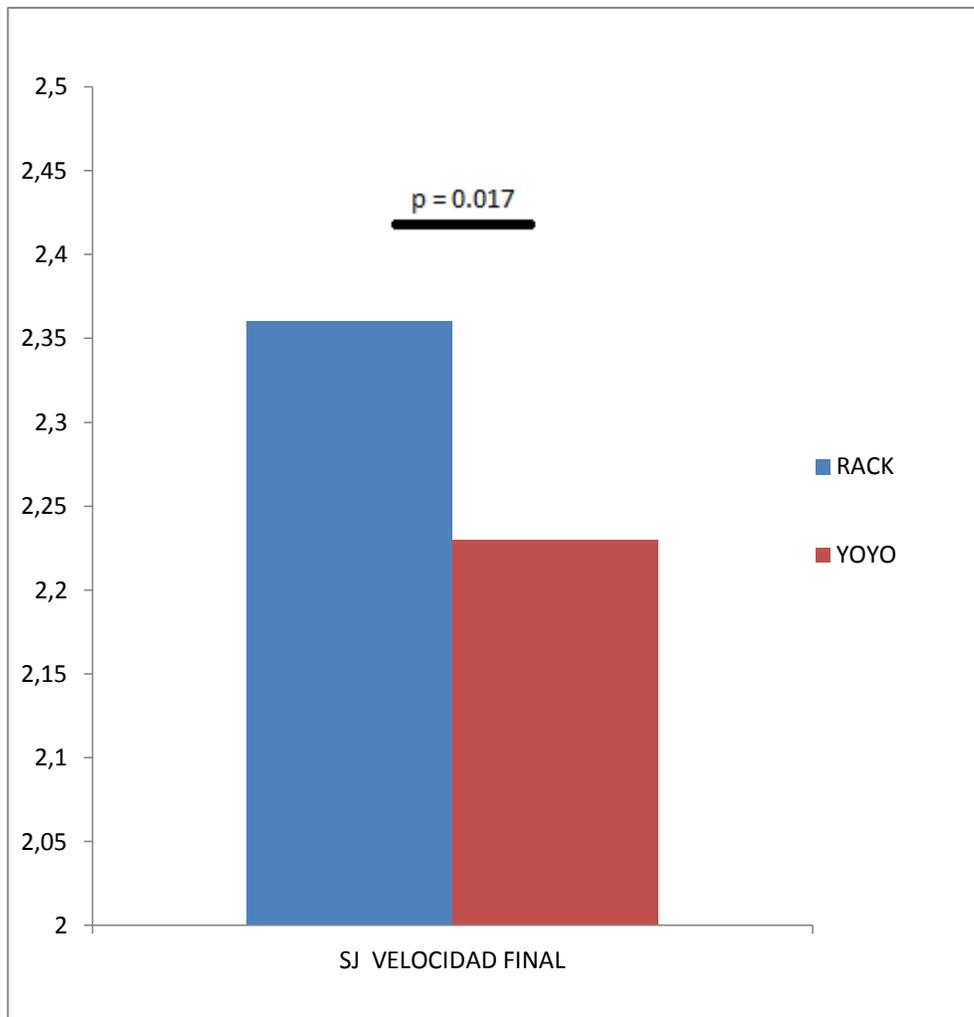


$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 28, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de velocidad final de la variable de salto “Squat Jump” (SJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.017$).

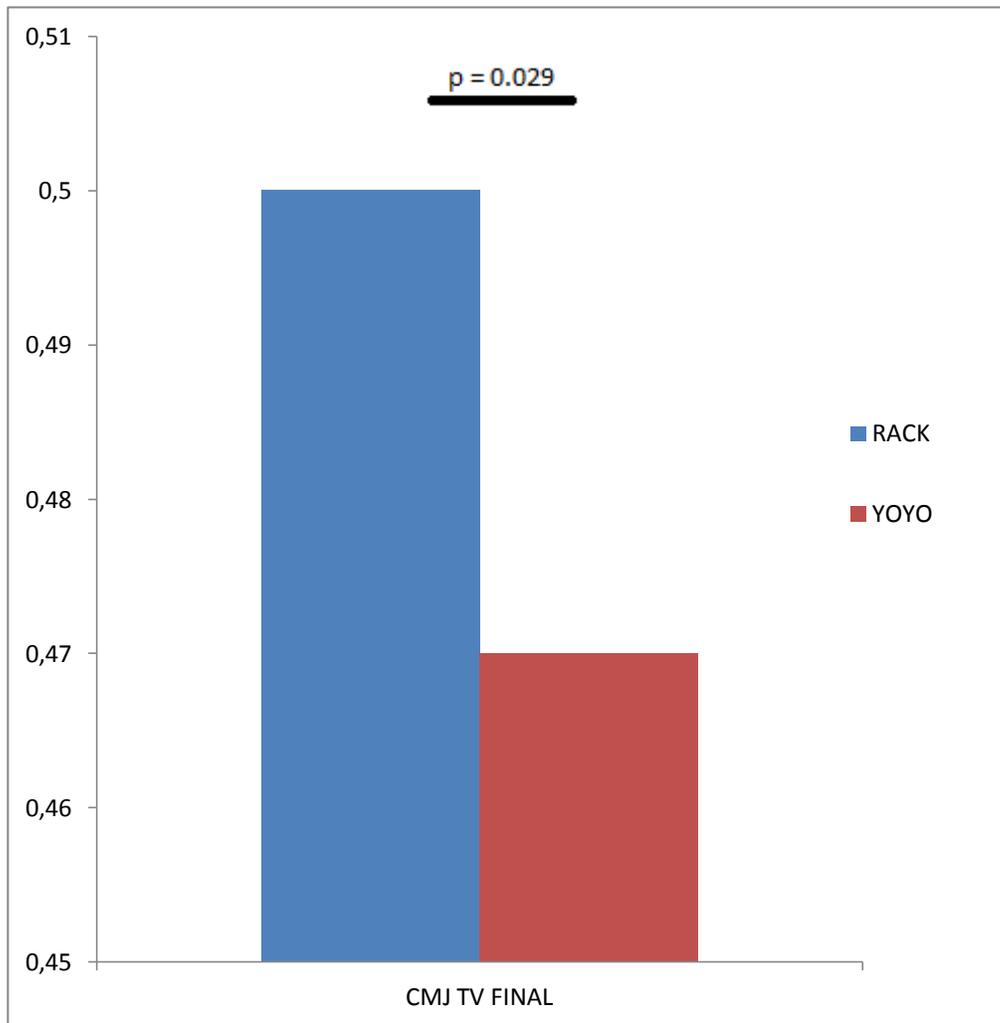
Figura 28. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Velocidad en SJ.



$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

En la Figura 29, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de tiempo de vuelo final (TV) de la variable de salto ‘‘Countermovement Jump’’ (CMJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.029$).

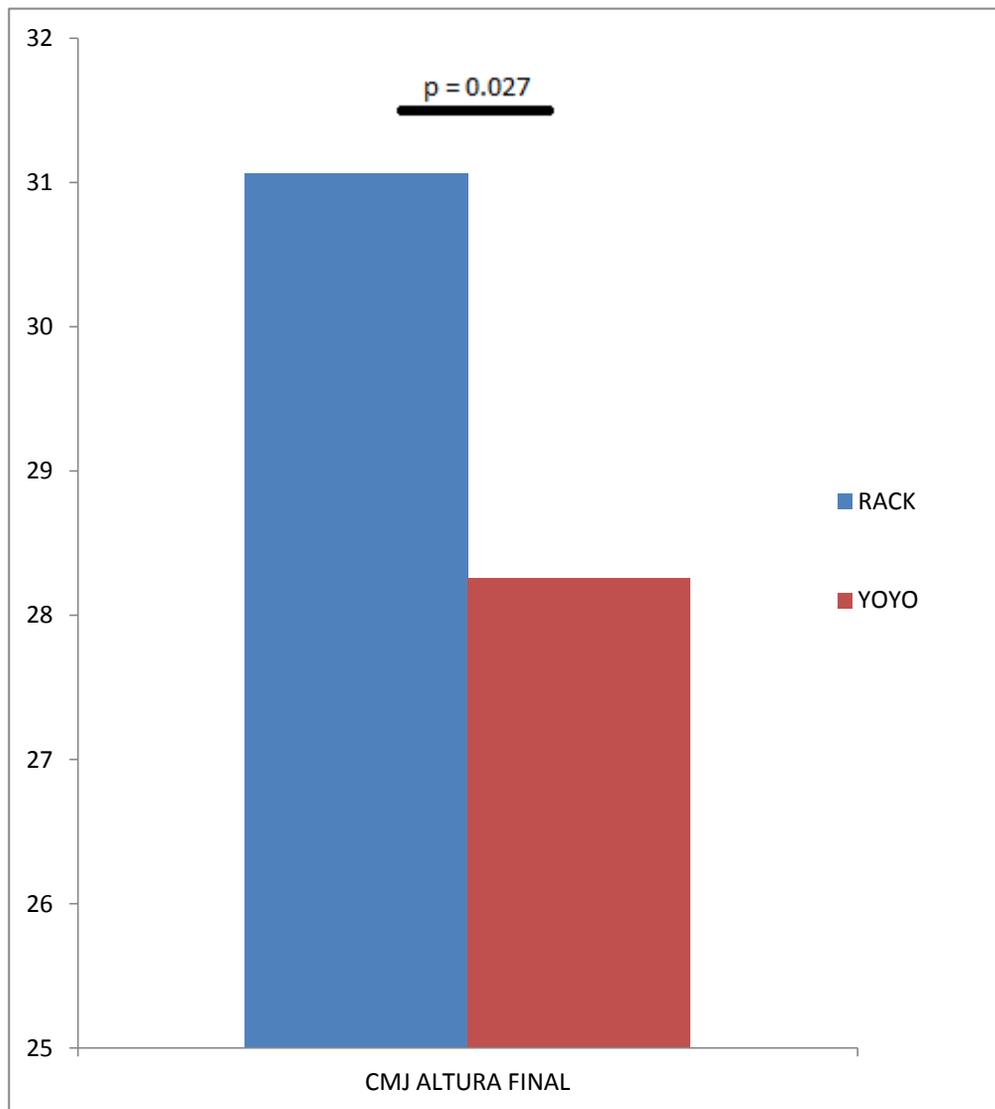
Figura 29. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Tiempo de vuelo en CMJ.



$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

En la Figura 30, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de altura final de la variable de salto ‘‘Countermovement Jump’’ (CMJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.027$).

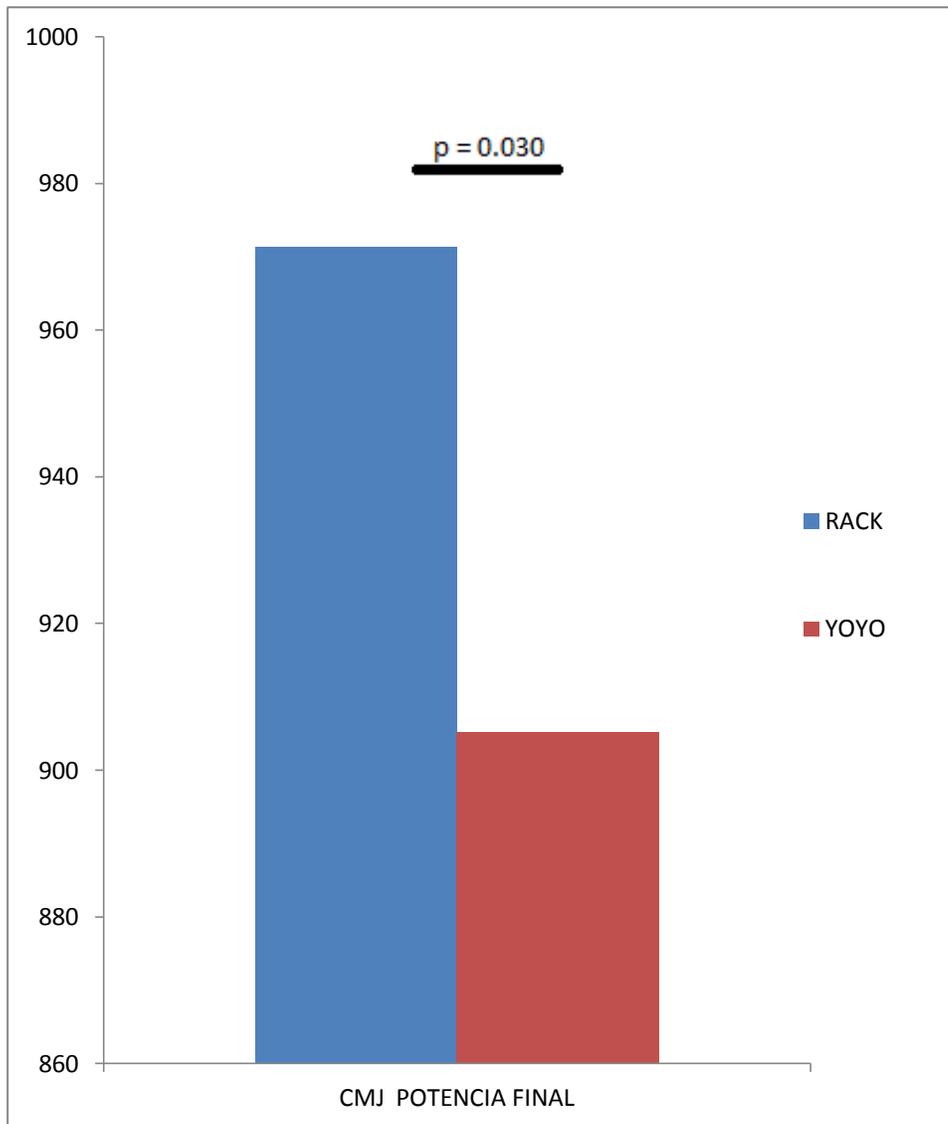
Figura 30. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Altura en CMJ



$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

En la Figura 31, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de potencia de la variable de salto ‘‘Countermovement Jump’’ (CMJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.030$).

Figura 31. *Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Potencia en CMJ.*

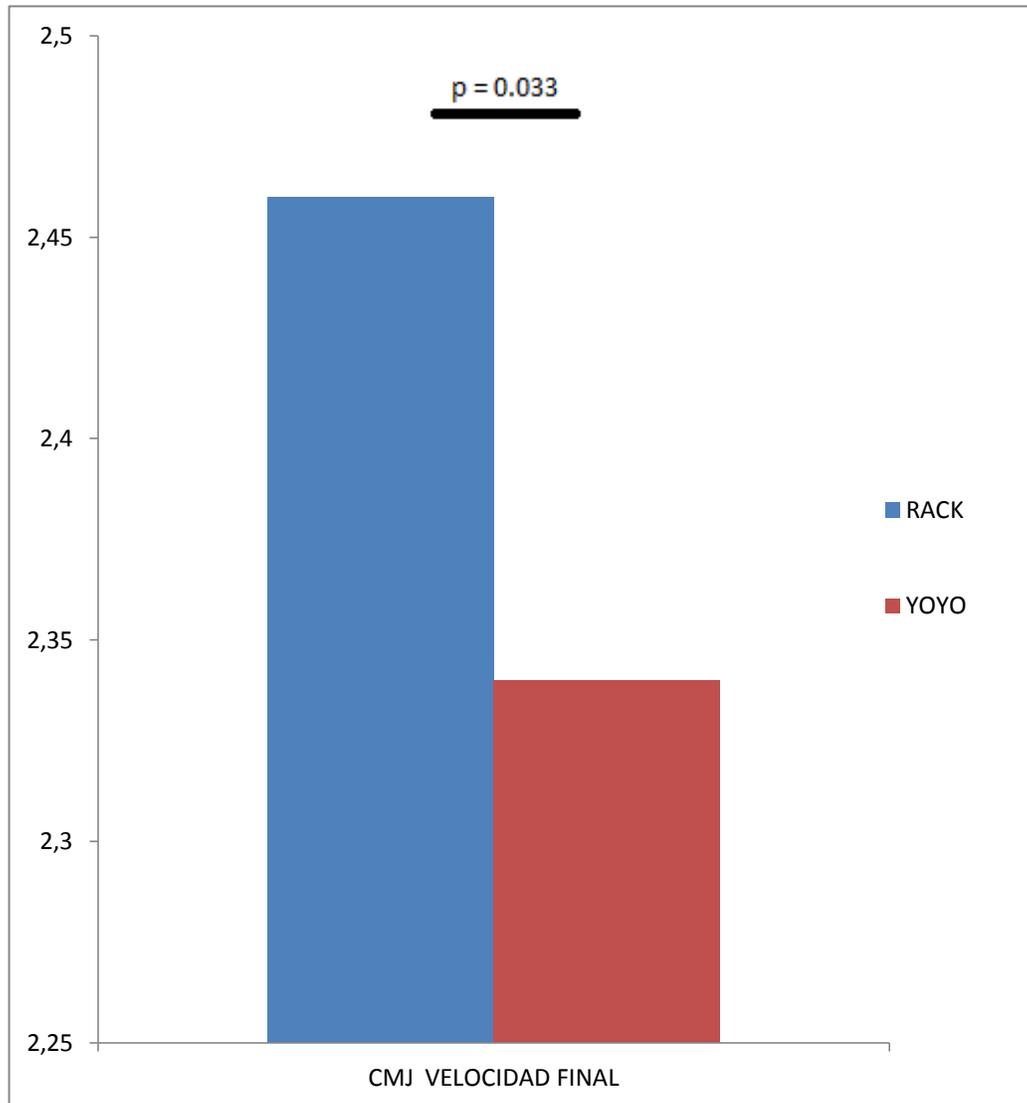


$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 32, se han observado que existen diferencias significativas en la categoría de velocidad de la variable de salto ‘‘Countermovement Jump’’ (CMJ) entre ambos medios a favor del entrenamiento excéntrico ($p = 0.033$).

Figura 32. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Velocidad en CMJ.

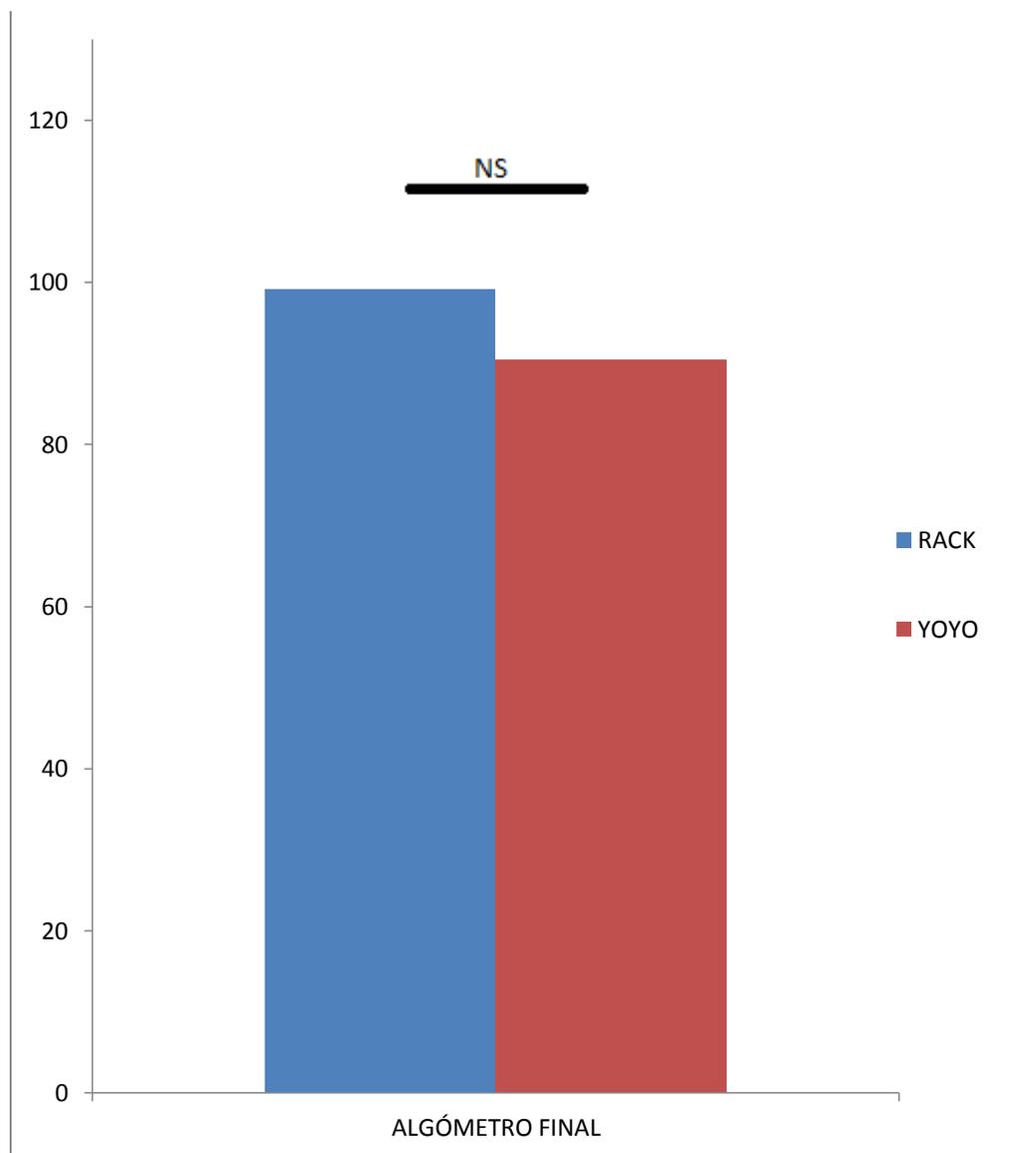


$P < 0.05$: Si hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 33, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de Algómetro final entre ambos medios de entrenamiento.

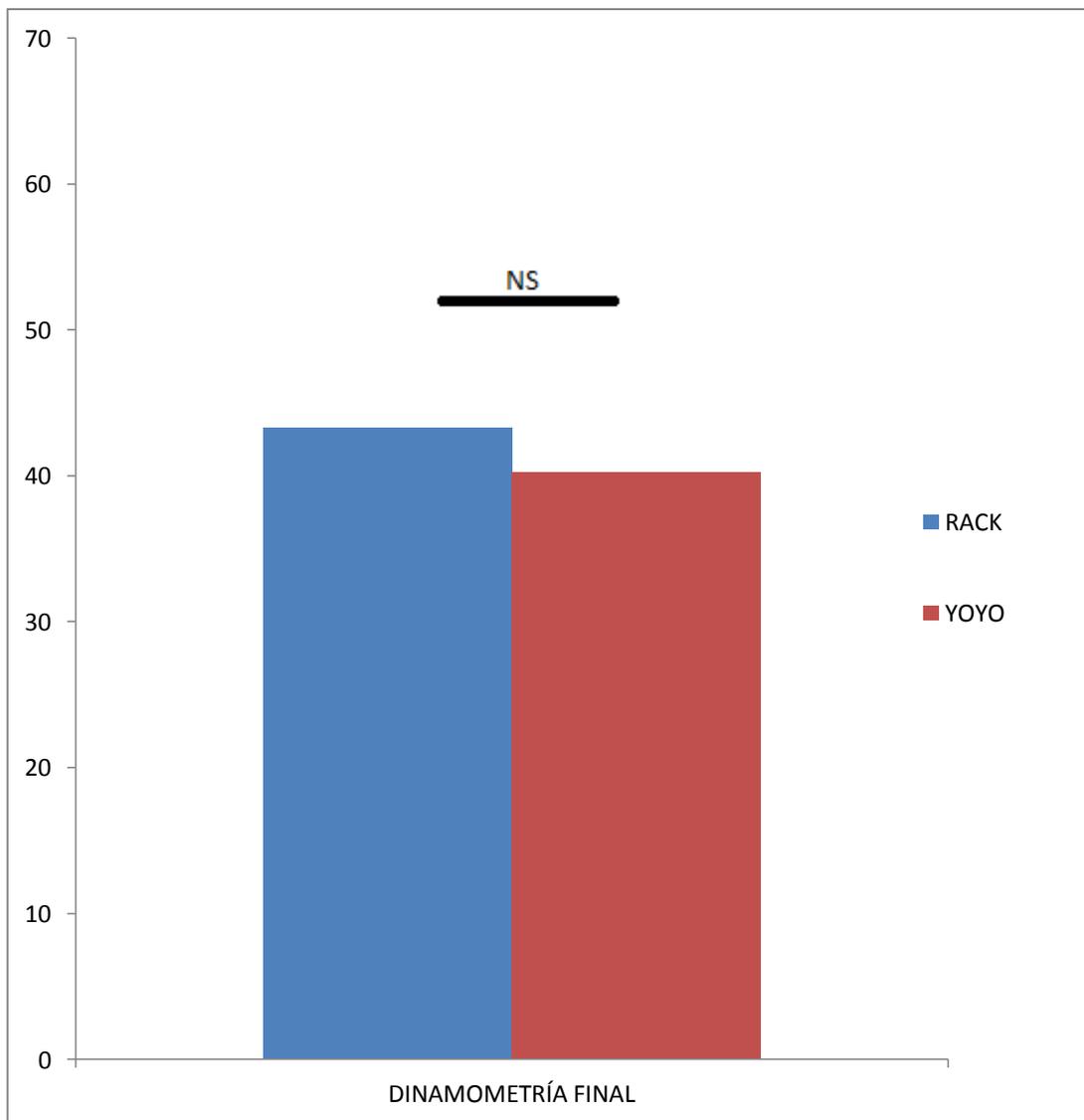
Figura 33. Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Algómetro.



NS: No hay diferencias significativas entre ambos grupos.

En la Figura 34, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de Dinamometría final entre ambos medios de entrenamiento.

Figura 34. *Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Dinamometría.*

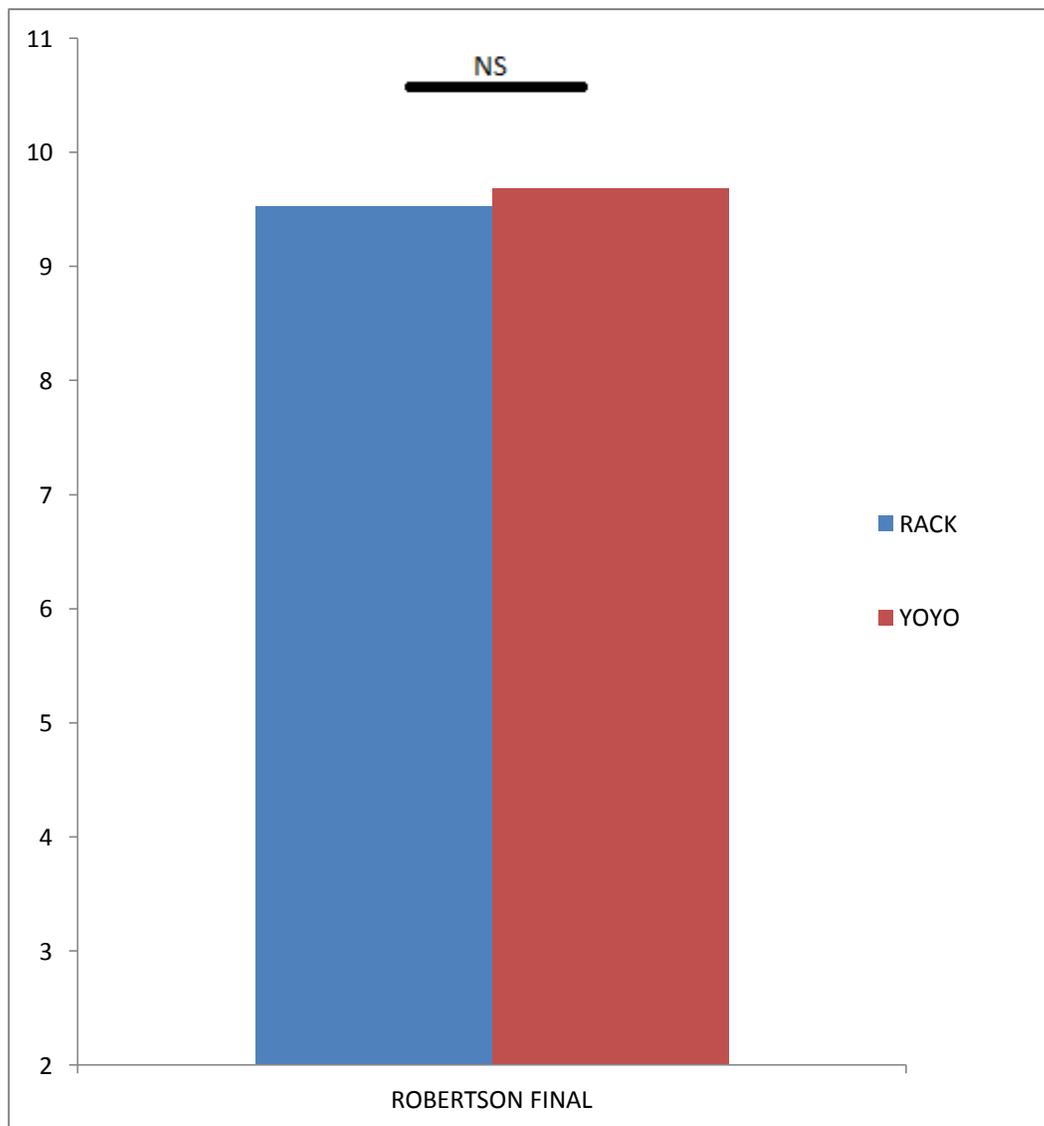


NS: No hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En la Figura 35, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de RPE (Robertson final) entre ambos medios de entrenamiento.

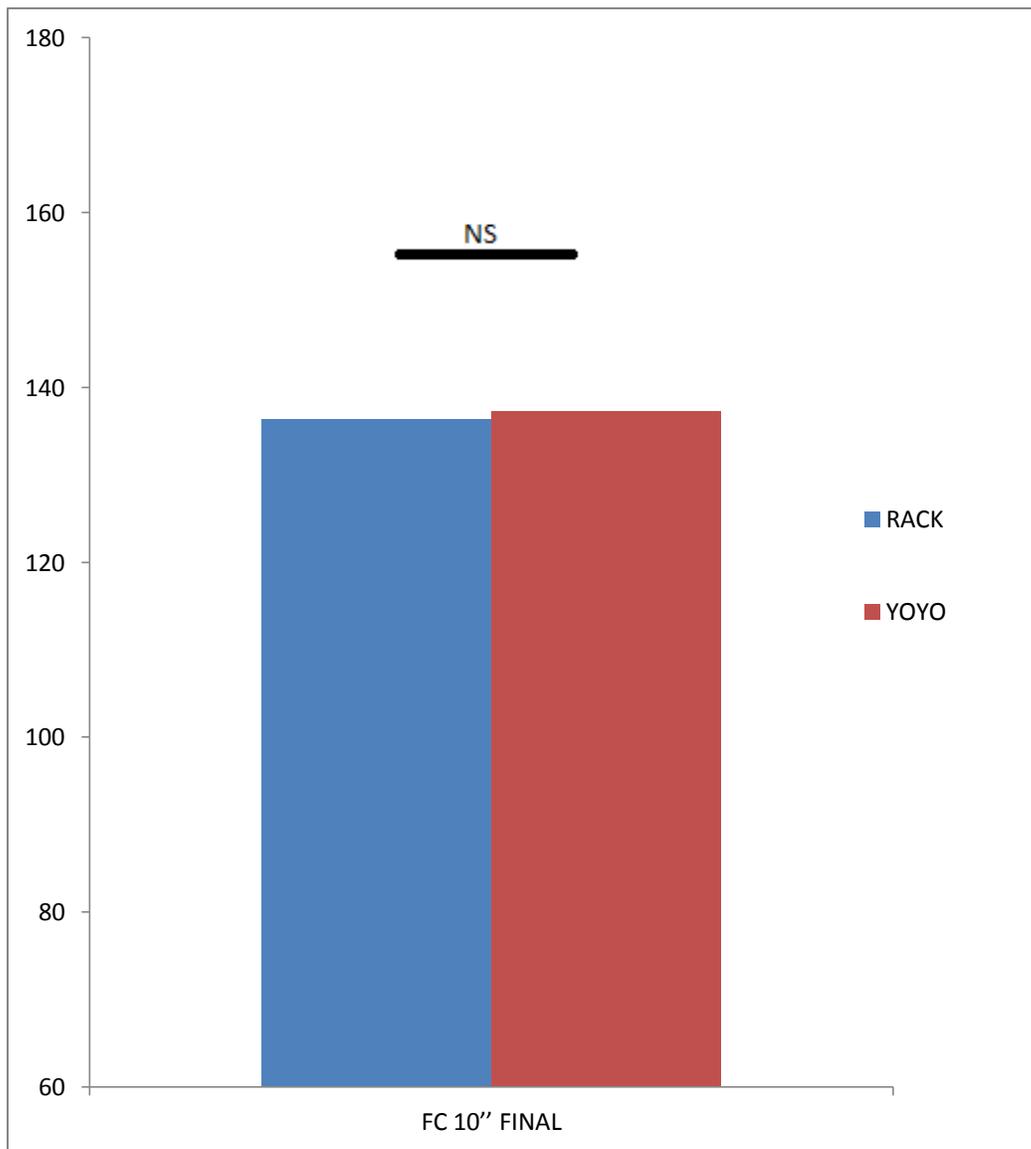
Figura 35. *Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de RPE.*



NS: No hay diferencias significativas entre ambos grupos.

En la Figura 36, se ha observado que no existen diferencias significativas en la variable de FC a los 10 segundos (FC 10'') final entre ambos medios de entrenamiento.

Figura 36. *Análisis Intergrupo (Rack y YOYO) en valores finales de Frecuencia cardíaca.*



NS: No hay diferencias significativas entre ambos grupos.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

DISCUSIÓN



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

5. DISCUSIÓN.

5.1. ESTUDIO 1.

Los hallazgos principales del presente estudio, muestran que el entrenamiento de la fuerza con una metodología Clúster en el ejercicio de sentadillas, produce fatiga neuromuscular y una pérdida de rendimiento en todos los protocolos utilizados (peso libre, peso guiado, peso libre + EMS y peso guiado + EMS). Sin embargo, la fatiga neuromuscular y la pérdida de rendimiento producidos con la aplicación de esta metodología, fue muy similar, sin encontrar diferencias significativas entre ellos.

En base a estos resultados, podemos indicar que se cumple la hipótesis 1, donde todos los medios planteados con la metodología de entrenamiento Clúster (peso libre, peso guiado, peso libre + EMS y peso guiado + EMS), han producido una fatiga neuromuscular y con ello una pérdida de rendimiento. Sin embargo, no se cumplieron las hipótesis 2 y 3, debido a que se obtuvieron valores muy similares entre los medios de peso libre y peso guiado por un lado, y peso libre + EMS y peso guiado + EMS por otro, en relación a la fatiga muscular, pérdida de rendimiento (SJ y CMJ), fuerza máxima isométrica, así como percepción subjetiva del esfuerzo.

En nuestros resultados hemos observado que la fatiga muscular aumentó tras la realización de todos los protocolos de fuerza utilizados, produciendo un descenso del rendimiento. La fatiga muscular, se define como la disminución de la capacidad de generar o mantener unos niveles de fuerza, o potencia, por parte de los músculos implicados durante el ejercicio físico (Minett & Duffield, 2014). Ésto, provoca una pérdida de velocidad del movimiento, resultando ser un indicador de alta validez para estimar la fatiga (González-Badillo et al., 2017) así, como a través de la pérdida transitoria y progresiva en la capacidad para generar fuerza (Sánchez-Medina et al., 2017). En este sentido, este hecho ha sido observado en investigaciones previas donde se comprobó una pérdida de rendimiento en el salto vertical y en la dinamometría de piernas tras la aplicación de protocolos de fuerza hipertrofica (Torres-López de Haro et al., 2019; Torres-López

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

de Haro et al., 2021). Con respecto al entrenamiento realizado con el peso libre, Thomasson y Comfort (2012), compararon los efectos producidos en un protocolo de entrenamiento con diferentes cargas de trabajo (0, 20, 40 y 60% 1RM) en squat Jump (SJ) con barra, con el objetivo de analizar la fatiga muscular a través de la variabilidad de fuerza, velocidad, potencia y desplazamiento. El estudio concluyó que un entrenamiento con cargas inferiores al 40% 1 RM y más de 6 repeticiones, no generó fatiga, mientras que una carga superior o igual al 60% 1RM con las mismas repeticiones, sí la generó, siendo una carga muy similar a la de nuestro estudio. Es por ello, por lo que el entrenamiento de hipertrofia parece ser uno de los métodos más fatigantes a nivel agudo, debido a la relación entre el volumen, intensidad y el descanso (Dankel et al., 2017). Bogdanis et al. (2011), compararon 2 protocolos de entrenamiento diferentes de fuerza máxima y fuerza hipertrofia en media sentadilla con el objetivo de valorar la capacidad de aceleración en cicloergómetro y su fatiga. Los resultados indicaron que con el entrenamiento de hipertrofia, se mostró un mayor índice de fatiga que con el entrenamiento de fuerza máxima. Por otro lado, la fatiga muscular, también afecta a la técnica de los ejercicios.

Hooper et al. (2014), comprobaron las variaciones que se produjeron en la técnica del ejercicio de la sentadilla con barra ante un protocolo de entrenamiento fatigante de 55 repeticiones, tanto en el ángulo de la rodilla como de la cadera. Los resultados de este estudio, demostraron que la técnica de ejecución se vio perjudicada a lo largo de la sesión, observándose un aumento de los ángulos de rodilla y cadera en las últimas repeticiones. Es por ello, por lo que como en nuestro estudio, se ha tenido que determinar de manera minuciosa, los elementos técnicos concretos para establecer las mediciones.

Igualmente, Maté-Muñoz et al. (2017), compararon los efectos producidos en el organismo, tanto en la concentración de lactato en sangre como en el rendimiento en un test de CMJ, después de la realización de 3 WODs (work of day) (1 por semana). Los WODS se clasificaron en tres tipos: Gimnásticos (máximo número de series de 5 pull-ups, 10 push-ups y 15 sentadillas sin peso en 20 minutos), entrenamiento metabólico (mayor número de saltos dobles a la

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

comba en 8 series de 20 segundos con 10 segundos de descanso) y halterofilia (máximo nº de powerclean en 5 minutos con un 40% 1 RM). Los resultados de este estudio, nos indican que pese a que todos los protocolos mostraron una fatiga muscular importante, los WODs gimnásticos y de halterofilia fueron los más fatigantes, especialmente este último, pudiendo ser debido a la aplicación de cargas externas. Todos los protocolos de nuestra investigación, utilizaron cargas externas, por lo que en todos se observó un aumento de la fatiga y una pérdida del rendimiento.

Con respecto a la intensidad, Morán-Navarro et al. (2017), analizaron la fatiga muscular y el tiempo de recuperación de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza. El primer protocolo, consistió en 3x5 repeticiones (de 10 máximas), el segundo 6x5 repeticiones (de 10 máximas) y el tercero fue de 3x10 repeticiones (de 10 máximas). Todos los protocolos tuvieron una intensidad del 75% 1RM tanto en press de banca como en sentadillas. Los resultados de este estudio, nos indicaron que entrenar hasta el fallo muscular (3x10 repeticiones), genera una disminución aguda significativamente mayor en CMJ y en la velocidad de movimiento de la barra en comparación con el resto de protocolos que no llegan al fallo. Pese a todo, todos los protocolos mostraron un aumento de la fatiga muscular. Sin embargo, los protocolos 3x5 y 6x5 tuvieron unas recuperaciones mucho más rápidas entre las 24-48 horas, teniendo éstos una intensidad de carga similar a la utilizada en nuestro estudio.

En esta misma línea, Belcher et al. (2019), analizaron el tiempo de recuperación de 3 entrenamientos únicos de fuerza de 4 series al fallo al 80% de 1RM tanto en sentadillas, peso muerto y press de banca (cada uno en una semana). Los resultados indicaron que los entrenamientos en sentadillas y press de banca, generaron un mayor daño y tiempo de recuperación que en el peso muerto. Asimismo, Raastad y Hallén (2000), analizaron la fatiga muscular y el tiempo de recuperación ante dos protocolos de entrenamientos en sentadillas con peso libre. El primero con una intensidad máxima a 3x3 repeticiones al 100% y el segundo, con una intensidad moderada a 3x3 repeticiones 70%. Se evaluó la capacidad de salto (altura SJ), así como los niveles de fuerza y actividad eléctrica del músculo, encontrando una disminución en el

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

SJ, siendo éstos, unos resultados similares a los de nuestro estudio. Sin embargo, esa disminución fue inferior con respecto al entrenamiento de intensidad máxima, debido a la mayor carga de trabajo. Estas investigaciones ponen también de manifiesto que el ejercicio de sentadillas es una de los más utilizados en las investigaciones, por tratarse de un ejercicio muy completo y porque puede aportar mucha información sobre parámetros de rendimiento deportivo.

Por otro lado, Watkins et al. (2017), también analizaron la variable neuromuscular del salto vertical y el estado de ánimo como indicador de fatiga muscular. Para ello, se tomaron las medidas de salto vertical y estado de ánimo antes y después de un protocolo de entrenamiento de fuerza (2 en días diferentes) en hang clean, push press, sentadillas, peso muerto y prensa de piernas. Los resultados indicaron que al inicio del segundo día de entrenamiento, se encontraron unos mayores descensos en la altura del salto, correlacionados con el nivel del estado de ánimo, por lo que entre ambos entrenamientos, es cuando se han obtenido los valores más bajos.

La RPE, también está considerada una variable fundamental para identificar y controlar a fatiga muscular. Emanuel et al. (2020), analizaron si el valor de RPE ante un ejercicio de fuerza como la sentadilla trasera, puede predecir el fallo en el ejercicio, así como la velocidad de la barra. Para ello, 20 sujetos realizaron en días separados 2 series de sentadillas y 2 series de press de banca hasta el fallo, con una carga entre el 70-83% 1 RM, mientras se registraba la velocidad de la barra. La RPE fue registrada en cada una de las repeticiones de la serie. Los resultados de este estudio, nos mostraron que un aumento de 1 punto en la escala de RPE, está asociado a un cambio de 11% hacia el fallo, así como a un 4% en la velocidad de la barra. Valores muy similares se obtuvieron en nuestro estudio, donde se han obtenido un aumento de un punto en la escala de esfuerzo percibido en cada una de las series realizadas en todos los medios utilizados.

Otros estudios han investigado acerca de la fatiga muscular y la pérdida de rendimiento como González-Badillo et al. (2016). En este caso, estos autores analizaron los efectos agudos en

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

el rendimiento y la fatiga en los deportistas, comparando 2 protocolos de entrenamiento de fuerza, siendo éstos uno al fallo (3x8 repeticiones) y el otro a la mitad de repeticiones al fallo (3x4 repeticiones) tanto en press de banca como en sentadillas con barra. Para identificar el tiempo de recuperación, se establecieron unas medidas 24 horas antes y 48 horas después de las mediciones. Éstas, consistieron en la altura CMJ, velocidad de movimiento, testosterona, cortisol y FC entre otras. Los resultados de este estudio, mostraron que el protocolo 3x8 (al fallo), resultó ser más fatigante con mayores reducciones en la velocidad de movimiento. El CMJ se redujo pasadas las 48 horas en el entrenamiento de 3x8, mientras que en el entrenamiento de 3x4, se redujo después de las 6 horas al igual que la FC post ejercicio.

En otro estudio reciente, los autores Pareja-Blanco et al. (2020), analizaron el tiempo de recuperación en 10 diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza, tanto en press de banca como en sentadillas. Los protocolos fueron: 6 repeticiones (12 máximo predicho), 12(12), 5(10), 10(10), 4(8), 8(8), 3(6), 6(6), 2(4), y 4(4). Se analizaron las variables mecánicas 24 horas antes y 48 horas después del entrenamiento, siendo éstas: altura en CMJ y la velocidad de levantamiento de la barra, así como variables hormonales como la testosterona, cortisol y hormona de crecimiento. Los resultados obtenidos, nos indican que los protocolos con las series más próximas al fallo, mostraron una mayor reducción en la función mecánica del músculo hasta 48 horas del entrenamiento, así como mayores incrementos en las concentraciones plasmáticas. Por tanto, el entrenamiento con repeticiones próximas al fallo, mostró una mayor fatiga y tasas más lentas de recuperación muscular y por tanto un mayor daño muscular. En nuestro estudio, a pesar de que también se trabajó con cargas próximas al 70%, el formato clúster de las recuperaciones, probablemente atenuó el nivel de fatiga que puede provocar una serie hasta el fracaso muscular.

Stone et al. (1987), estudiaron los cambios producidos en FC, RPE y lactato tras un ejercicio de sentadillas de 10 series al fallo con 30 segundos de descanso, tanto en sujetos entrenados como no entrenados. En concordancia con nuestro estudio, los resultados indicaron que el entrenamiento de la fuerza muscular, aumentó la FC y la RPE. En esta misma línea, Fernandes

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

(2018), analizó en su estudio los efectos agudos en parámetros internos (FC, REP y lactato) y en parámetros externos (potencia máxima voluntaria) en una única sesión de entrenamiento de fuerza (10x10 repeticiones al 60% 1RM en jóvenes (con una edad media de 22 años), así como en sujetos de mediana edad con experiencia en entrenamiento (con una edad media de 39 años). Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas entre ambos grupos en los parámetros de carga interna analizados. Sin embargo, los sujetos de mediana edad mostraron una mayor fatiga y un menor nivel, mostrando así, una menor potencia muscular. Igualmente, los autores Jukic y Tufano (2019), analizaron los efectos de los niveles de velocidad, potencia y RPE, y con ello la fatiga aguda en 2 protocolos diferentes de entrenamiento en el ejercicio de la sentadilla trasera. El primer protocolo, consistió en 3x10 repeticiones con 4 minutos de descanso y el segundo consistió en 5x6 con 2 minutos de descanso (ambos al 70% 1RM y sin llegar al fallo muscular). Los resultados de dicho estudio, fueron muy similares tanto en la velocidad como en la potencia, mientras que en el protocolo de 5x6, se obtuvieron valores significativamente más bajos que en el primer protocolo debido a la acumulación de fatiga. Por tanto, al igual que en nuestro estudio (70% 1RM), sería recomendable redistribuir más los descansos entre series para retrasar en gran medida la fatiga muscular. Resultados muy similares fueron obtenidos por Piqueras-Sanchiz et al. (2021), que compararon los efectos producidos en parámetros mecánicos, neuromusculares y metabólicos en 2 protocolos de entrenamiento diferentes, siendo éstos: 3x8 repeticiones con 5 minutos de descanso y 6x4 repeticiones con 2 minutos de descanso (ambos al 75% 1 RM). El entrenamiento 6x4, mostró unos valores más bajos de fatiga con un mayor rendimiento de fuerza, velocidad y potencia. Sin embargo, el protocolo 3x8, indujo mayores concentraciones de lactato, así como mayores reducciones en la altura de CMJ y velocidad. Por tanto, se podría indicar que realizar series con menos repeticiones y con intervalos de descanso más cortos, podría reducir la fatiga muscular, sobre todo en las repeticiones finales de cada serie. De esta manera, y apoyando a esta idea, Fonseca et al. (2020), compararon los efectos agudos producidos tras dos entrenamientos agudos en el ejercicio de la sentadilla con barra. El primer entrenamiento, fue al fallo muscular, y el segundo sin llegar al fallo muscular. Las variables neuromusculares analizadas fueron la altura y potencia en el CMJ, que se realizaron inmediatamente antes del entrenamiento, así como a los 15 segundos, 10, 20 y 30 minutos después del mismo. Tras el entrenamiento al fallo muscular, los sujetos presentaron una mayor disminución en la altura y potencia de CMJ, incluso a

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

los 20 y 30 minutos después del entrenamiento, que con el entrenamiento que no llegaba hasta el fracaso muscular. Esto, nos indica, que es fundamental controlar las variables del entrenamiento (intensidad, volumen y recuperación) durante las sesiones de fuerza, porque de ellas dependerá la aparición de una mayor o menor fatiga muscular. En este sentido, numerosos estudios han comparado los efectos sobre la fatiga y el rendimiento que causa la realización de entrenamientos tradicionales frente a entrenamientos clúster o de conglomerados, que permiten la realización de más repeticiones con mayor número de descanso entre repeticiones o entre series (Iglesias-Soler et al., (2014).

Igualmente, Mora-Custodio et al. (2018), compararon los efectos agudos a nivel mecánico y metabólico en dos variantes de clúster con el entrenamiento tradicional con cargas, donde se obtuvo una pérdida de velocidad menor, así como una disminución en la concentración de lactato y una menor pérdida de en la altura de CMJ a favor de los protocolos de entrenamiento clúster. Cuevas et al. (2020), obtuvieron resultados muy parecidos a los anteriores estudios donde la velocidad media de la barra fue inferior en el entrenamiento tradicional en comparación con el entrenamiento clúster. Sin embargo, los valores de RPE, fueron superiores en el entrenamiento tradicional, debido al percibir un mayor esfuerzo por la no aplicación de los descansos entre bloque de series. Además Dello Iacono et al. (2020) en su estudio con 20 hombres mayores, realizaron otra comparativa más entre ambos protocolos, dando como resultado que con la metodología clúster, se consiguieron mejores indicadores de potencia y menor RPE que en el entrenamiento tradicional. Por tanto, comprobamos otra evidencia más que el entrenamiento clúster, resulta ser beneficioso para aumentar el volumen del entrenamiento y retrasar la aparición de la fatiga muscular González-Hernández et al. (2020).

Si nos centramos ahora en el uso del peso guiado, nos encontramos con menor cantidad de estudios científicos que hayan analizado la fatiga muscular tras la realización de entrenamientos con una máquina de peso guiado.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Raeder et al. (2016), realizaron un estudio comparando los aspectos neuromusculares, fisiológicos y perceptivos de 5 tipos de protocolos de sentadillas con diferentes medios como es el multipower (4x6 repeticiones al 85%), drop set (multipower 1x6 repeticiones seguido de 3 drop set), excéntrico (4x6 repeticiones siendo la concéntrica al 70% y la excéntrica al 100%), Yoyo Squat (4x6 repeticiones al fallo) y pliométrico (4x15 repeticiones al fallo). A nivel neuromuscular, se observó un descenso en la capacidad de CMJ en todos los protocolos, incluso manteniéndose hasta las 48 horas siguientes. Por tanto, al igual que en nuestra investigación, el entrenamiento de fuerza con peso guiado, causó una fatiga aguda muscular al igual que los otros protocolos empleados.

Asimismo, Valera-Olalla et al. (2020), también estudiaron la fatiga aguda en media sentadilla en un único entrenamiento con cargas, tanto en un protocolo de entrenamiento tradicional como en un entrenamiento clúster en multipower. Los resultados de este estudio indicaron que ambos protocolos generaron una fatiga muscular produciéndose reducciones en la aparición de lactato, CMJ así como en la velocidad de la barra.

Por tanto, como vemos al igual que en nuestra investigación, el entrenamiento con peso guiado, genera unos niveles importantes de fatiga, que se observa sobre todo en la pérdida de rendimiento en los saltos verticales (SJ y CMJ). Ésto es debido, a que con la aplicación de una carga externa en sentadillas y en este caso con el medio del multipower, se genera una fatiga aguda neuromuscular en la musculatura del cuádriceps, independientemente del protocolo de entrenamiento de fuerza utilizado. Estos resultados, coinciden con el estudio de González-Hernández et al. (2021), que muestra que el entrenamiento en sentadillas, tanto con cargas máximas al fallo muscular como con cargas submáximas, genera una fatiga aguda, independientemente del protocolo utilizado, aunque con mayores diferencias tras el entrenamiento hasta el fallo muscular. En este caso, la metodología del entrenamiento clúster, sí mostró

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

importantes descensos en dichas variables al igual que en el peso libre o incluso en sus combinaciones con EMS. En el estudio de revisión y meta análisis de Jukic et al. (2020), también reflejaron que la redistribución de los descansos con la metodología clúster, permite obtener un retardo en la aparición de la fatiga aguda neuromuscular en el entrenamiento de fuerza. Sin embargo, sería muy interesante, analizar y comparar estos indicadores de fatiga con otros protocolos de entrenamiento, tales como la fuerza resistencia, la fuerza máxima o incluso la pliometría. Pese a eso, este entrenamiento con metodología clúster al 70% 1 RM como carga submáxima, sí generó esa fatiga aguda neuromuscular. Valores muy similares ocurrieron en el resto de variables como en REP y FC. Con respecto a la primera, los sujetos mostraron una importante y significativa modificación en el esfuerzo percibido y realizado a lo largo de los diferentes bloques, el cual fue en progresión ascendente durante el transcurso del entrenamiento. Este hecho, entra dentro de la lógica, puesto que la fatiga va acumulándose progresivamente a lo largo de las series o bloques y más aún cuando se trabaja con cargas externas. Con respecto a la FC, también se obtuvo un importante incremento significativo de la misma en cada uno de los bloques realizados. Ésto es debido, a que ante una mayor carga de trabajo y de esfuerzo por la duración del entrenamiento, el sistema cardiovascular, precisa de una mayor y frecuente aportación de oxígeno y retirada del anhídrido carbónico para completar el entrenamiento (Burton et al., 2021). Sin embargo, estas dos últimas variables no llegaron a un rendimiento máximo, incluso al final del entrenamiento, donde presentaron un margen o reserva de la misma. Ésto puede ser debido, a que además de trabajar con una carga del 70% 1RM, su combinación con la metodología clúster, va a permitir realizar pequeños descansos tanto entre series de repeticiones como entre bloques, pudiendo así, aumentar el volumen de entrenamiento (Arazi et al., 2021).

Por otro lado, la dinamometría de piernas, también mostró modificaciones significativas en todos los medios utilizados por separado. Con estos resultados, se vuelve a poner de manifiesto que el entrenamiento realizado, independientemente del medio utilizado, produjo un descenso del rendimiento y la fuerza del tren inferior, incluso tras la utilización de la metodología clúster. Debemos atender que esta medición establece una relación entre la musculatura isquiotibial y lumbar con la fatiga del tren inferior. Asimismo, a pesar de que este

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

instrumento valora de forma global la fuerza del tren inferior mediante un ejercicio global de tracción, (donde también participan grupos musculares no implicados directamente en el entrenamiento), se han observado descensos del rendimiento.

Pese a esto, en los valores de dolor muscular (Algómetro), no se han producido modificaciones importantes y significativas al utilizar diferentes medios de entrenamiento. La contracción muscular depende fundamentalmente de la fatiga aguda, así como de la motivación y del dolor. Esto, hace que sea difícil distinguir que esas variaciones sean por fatiga o daño muscular (Finsterer, 2012). En la literatura científica, encontramos un estudio realizado por Baker et al. (1997) en mujeres no entrenadas, en el que se encontraron diferencias significativas en la presión de dolor en la musculatura anterior y posterior de las piernas, tanto inmediatamente después del entrenamiento como en días posteriores. Estos resultados, difieren de los obtenidos en nuestro estudio, debido a que en nuestra investigación, los sujetos experimentales sí disponían de experiencia en entrenamiento con cargas. Es por ello, por lo que como vemos, los sujetos entrenados soportan mejor el dolor muscular al estar más acostumbrados al entrenamiento.

Por otro lado, algunas investigaciones han estudiado la fatiga muscular tras la utilización concurrente de EMS con ejercicios voluntarios de fuerza. Neyroud et al. (2017), evaluaron la fatiga neuromuscular comparando 2 protocolos diferentes de entrenamiento, consistentes en la realización de 50 squat Jump con o sin EMS. Las variables analizadas fueron la fuerza de contracción y la activación máxima voluntaria. Los resultados indicaron, que el protocolo que utilizó EMS produjo un importante descenso del rendimiento. En nuestro estudio también se observó un descenso del rendimiento en el salto vertical, y la dinamometría, pero no podemos compararlo, puesto que a diferencia de este estudio, nosotros, sí hemos utilizado cargas externas.

Dreibati et al. (2010), analizaron el impacto de la frecuencia de estimulación tanto en la fuerza (contracción máxima voluntaria) como en la fatiga muscular aguda, con el objetivo de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

proponer aplicaciones prácticas tanto en el campo del entrenamiento deportivo como en el campo de la rehabilitación. Para ello, en este estudio, se utilizaron 3 frecuencias distintas de 100, 50 y 20 Hz durante 20 minutos. Los resultados que obtuvieron, reflejaron que el entrenamiento con una mayor frecuencia de estimulación, adquirió una mayor disminución en la fuerza muscular provocado por una mayor fatiga aguda. En este caso, aunque nuestro entrenamiento no duró 20 minutos como en este estudio, sí coincide en que la frecuencia máxima de estimulación (máxima soportada por el sujeto) genera una mayor fatiga muscular.

Por otro lado, Deley et al. (2014), en un estudio con sujetos sanos, analizaron la fatiga aguda muscular tras la aplicación de EMS de larga duración con una frecuencia tanto continua como variable. Los resultados indicaron que la aplicación de EMS continua, generó una mayor fatiga al finalizar el entrenamiento, por lo que la aplicación de EMS variable mostró menores índices de fatiga muscular. De esta manera al igual que en nuestro estudio, la aplicación de EMS variable, generó un mayor volumen de entrenamiento por el retraso en la aparición de la fatiga. Un año más tarde este mismo autor (Deley et al., 2015), analizó la fatiga aguda muscular con frecuencias continuas y variables pero de corta duración (6 segundos). Los resultados obtenidos, indicaron que un entrenamiento combinado con una frecuencia variable retrasó la aparición de la fatiga y produjo un aumento del volumen del entrenamiento.

Estos estudios ponen de manifiesto que la aplicación de EMS puede influir en la modificación del rendimiento deportivo, así como contribuir a una mayor fatiga muscular. La aplicación de EMS de forma concurrente con la contracción voluntaria realizada por el sujeto para vencer cargas externas, también resultó fatigante durante todo el protocolo de entrenamiento de fuerza, tanto en peso libre como peso guiado. Los resultados obtenidos entre los valores iniciales y finales en nuestra investigación, mostraron un descenso en el rendimiento tras la aplicación de esta metodología clúster con el entrenamiento combinado de EMS y cargas externas en sentadillas. Todas las categorías de las variables de salto vertical (SJ y CMJ), mostraron un descenso significativo tras el entrenamiento. La aplicación de EMS a la frecuencia máxima soportada por el

sujeto, produce una carga añadida a la contracción muscular voluntaria realizada para vencer cargas externas, y con ello se podría generar más fatiga neuromuscular y una mayor pérdida de rendimiento (Neyroud et al., 2017). Con respecto a la dinamometría de piernas en el entrenamiento combinado con EMS, también se encontraron diferencias importantes entre los valores iniciales y finales. En este sentido, la corriente eléctrica generada por el dispositivo, se realizó tanto en la fase concéntrica como excéntrica, siendo éstas de la misma duración (1 segundo). De esta manera, la prueba de dinamometría de piernas, donde se analiza específicamente la fuerza extensora de las piernas así como la zona lumbar, detectó una importante fatiga aguda neuromuscular en ambos medios de entrenamiento en combinación con EMS.

Por otro lado, las variables de REP y FC, también mostraron cambios importantes durante el protocolo de entrenamiento con EMS. A pesar de que ha habido cambios y modificaciones en los valores de REP, podemos indicar que estos valores no han sido máximos al final del entrenamiento aunque sí significativos. Ésto puede ser debido a que la carga de entrenamiento fue del 70% 1RM pudiendo disponer de un margen de esfuerzo, además de esa aplicación de descansos intermitentes, que proporciona la metodología de entrenamiento clúster. Asimismo, Richardson y Clarke (2016) también analizaron la RPE en el ejercicio de sentadillas utilizando para ello una carga similar (60% 1RM), combinando café y la cafeína, donde sí se obtuvieron aumentos en el esfuerzo percibido a lo largo de las series. Zourdos et al. (2016), realizaron un estudio en el que compararon el RPE con diferentes intensidades en levantadores con y sin experiencia en el ejercicio de la sentadilla. Al igual que en nuestro estudio, sí se encontraron aumentos en la RPE con intensidades submáximas (60-70% 1RM), aunque no significativos entre ambos protocolos. Respecto a la FC, también podemos indicar que ha mostrado cambios significativos durante el protocolo de entrenamiento, los cuales han ido en aumento a lo largo de los diferentes bloques. Sin embargo, aunque la FC al final fue elevada, podemos observar que no fue máxima, y esto, puede ser debido a que el entrenamiento se realizó al 70% 1RM y no al 100% 1RM, teniendo por tanto ese margen de reserva. Apkarian (2019) en su estudio, observó que la FC también aumentó en su programa de entrenamiento de fuerza que consistió en comparar los

efectos agudos que tenía las FC tras dos protocolos de fuerza en la prensa de piernas. Además, estos resultados no fueron máximos lo que nos hace pensar que la FC en el entrenamiento de fuerza, no llega a valores máximas cuando se trabaja con cargas submáximas. Monteiro et al. (2018), también analizaron la variabilidad de la FC tras el entrenamiento de fuerza. En este caso, se analizó la variabilidad de ésta, en diferentes momentos tras el entrenamiento, de manera que sólo a los 15 minutos tras la prueba, se encontraron diferencias significativas con respecto a la FC inicial. De esta manera, estos resultados, son similares a los nuestros, con lo que queda confirmado que el entrenamiento de fuerza eleva la FC, independientemente del método de entrenamiento utilizado.

Al igual que en la metodología clúster sin la aplicación de EMS, la variable del dolor muscular (Algómetro), no mostró cambios significativamente importantes entre el inicio y el final del protocolo. Esto, puede ser debido a la falta de experiencia de los participantes en este tipo de mediciones, al ser una medida de algún modo subjetiva y por miedo a sentir dolor. Asimismo, entrenamiento clúster, podría no haber resultado lo suficientemente intenso como para generar ese dolor muscular en la musculatura del cuádriceps.

Tras discutir los resultados que hacían referencia a las diferencias Intragrupo, ahora nos centraremos en las diferencias intergrupo. Los resultados han puesto de manifiesto, que no existen diferencias significativas en los niveles de fatiga y rendimiento entre los diferentes protocolos de entrenamiento.

En la literatura científica no hay numerosas investigaciones que comparen la fatiga muscular entre las metodologías clúster en peso libre y peso guiado. En este sentido, la aplicación de los descansos tanto entre series como repeticiones, genera una mejora en el rendimiento del deportista, al poder desarrollar un mayor volumen de entrenamiento (Cuevas-Aburto et al., 2020).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Los resultados obtenidos en nuestra investigación, nos muestran que no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes protocolos, y las diferencias observadas no han podido discriminar qué protocolo ha generado una mayor fatiga neuromuscular. Ésto puede ser debido, a que todos los protocolos de entrenamiento se realizaron con una carga externa estimada del 70% 1RM. Al ser una carga submáxima y con descansos intermitentes, no se han identificado diferencias significativas entre los distintos medios, debido a que la intensidad de los mismos fue similar, tanto en la carga aportada como en frecuencia del estímulo de EMS. Asimismo, podemos indicar que la aplicación de EMS (mayor soportada por el sujeto), no generó una fatiga adicional, pudiendo justificarse porque la frecuencia del estímulo no fue lo suficientemente intensa como para reflejar una mayor fatiga que el entrenamiento que no aplicó EMS. La razón de que los sujetos no estuvieran familiarizados con la aplicación de la EMS, sería posible que no identificaran bien su máximo estímulo o frecuencia soportada. Valores muy similares han sido encontrados en la variable de dolor muscular (Algómetro), donde a pesar de presentar unos valores más altos de dolor muscular localizado en el entrenamiento con peso libre, no se encontraron diferencias significativas con respecto a los demás medios de entrenamiento. En este sentido, es muy probable que la fatiga aguda neuromuscular de los sujetos al terminar el entrenamiento, no reflejara valores tan dispares con respecto a los otros medios por la subjetividad de la prueba. Quizás con una intensidad de carga mayor y la no aplicación de los descansos a través de la metodología Clúster, permitiría aumentar la fatiga aguda y con ello los valores de dolor muscular localizado.

Por otro lado, las variables de REP y FC también mostraron valores muy similares entre los diferentes medios planteados. En relación al primero, pese a que la combinación de peso libre con EMS generara un mayor esfuerzo percibido, esa diferencia con el resto de protocolos no fue significativamente importante. Ésto puede ser debido, a que la intensidad (70% 1RM) fue siempre la misma en todos los protocolos, no generando un estímulo diferente. Asimismo, la aplicación de EMS tampoco resultó ser un factor determinante para catalogar al medio combinado de peso libre y EMS como más fatigante que el medio de peso guiado y EMS, debido a que esas diferencias no resultaron ser significativas. Estos resultados nos dan a entender que el entrenamiento con una

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

carga similar (70% 1RM), no resultara ser tan intenso como para poder diferenciar entre peso libre y peso guiado, puesto que la intensidad de la EMS fue la misma para cada uno de los sujetos. Con respecto a la variable analizada de la FC, a pesar de que se obtuvieron mayores valores en los entrenamientos que se utilizó peso libre (con o sin EMS), no resultaron ser significativamente diferentes con respecto a los entrenamientos realizados con peso guiado (con o sin EMS). Este dato resulta ser muy interesante, ya que vemos que la aplicación o no de EMS en peso libre, hace que la FC sea más elevada que el mismo protocolo en peso guiado. Sin embargo, como hemos comentado, esas diferencias no son tan importantes. Ésto puede ser debido, a que el medio del peso libre, sí genera unos estímulos diferentes con respecto al peso guiado, dando la idea de si el entrenamiento hubiera sido más intenso o con un porcentaje de carga más alto, podrían haber sido mucho mayores.

Por último, la variable de la dinamometría de piernas, también presentó unas modificaciones importantes en cada uno de los medios. Sin embargo, esas diferencias no resultaron ser significativas entre los diferentes medios de entrenamientos. Al igual que en otras variables, quizás la intensidad del entrenamiento, hiciera que no se encontraran diferencias entre los diferentes medios. Además, la aplicación de una metodología clúster con descansos intermitentes entre bloque de repeticiones, hizo que los sujetos pudieran descansar y con ello aumentar el volumen del entrenamiento, así como retrasar la aparición de la fatiga. Por tanto, los resultados obtenidos al final de los protocolos utilizados, no mostraron esas diferencias entre los medios en el análisis Intergrupos.

5.2. ESTUDIO 2.

Los hallazgos principales del presente estudio, muestran que el entrenamiento de la fuerza hipertrofia en el ejercicio de sentadillas, produce fatiga neuromuscular y una pérdida de rendimiento en los dos protocolos utilizados como son el peso libre y entrenamiento excéntrico (Inertial Flywheel). Sin embargo, la fatiga neuromuscular y la pérdida de rendimiento fue significativamente mayor para el entrenamiento isoinercial en todas las variables de salto vertical.

En base a estos resultados, podemos indicar que se cumple la hipótesis 1, donde los dos medios planteados (peso libre y entrenamiento isoinercial han producido una fatiga neuromuscular y con ello una pérdida de rendimiento). Asimismo, también se cumplió la hipótesis 2, donde se obtuvieron diferencias significativas entre ambos medios de entrenamientos en las variables del salto vertical (SJ y CMJ) a favor del entrenamiento excéntrico (Inertial Flywheel).

A nivel general, podemos afirmar que ambos entrenamientos por separados, resultan ser muy interesantes desde el punto de vista del rendimiento deportivo. Autores como Petré et al. (2018), realizaron un meta análisis de 20 estudios experimentales para identificar los efectos que produce el entrenamiento isoinercial, tanto en crecimiento muscular, máxima fuerza dinámica, potencia, y desarrollo del movimiento horizontal y vertical. Los resultados obtenidos de este meta análisis, nos indican que el entrenamiento excéntrico, muestra unos incrementos significativos en la fuerza muscular tras un periodo de entrenamiento de 4 a 24 semanas. Además, también se encontraron mejoras en la hipertrofia, potencia, y desplazamientos verticales y horizontales. Por tanto, el entrenamiento excéntrico, resulta ser una metodología muy interesante y útil para conseguir beneficios. Sin embargo, nosotros conociendo sus beneficios, pretendemos conocer cómo afecta a la fatiga aguda en el organismo de los deportistas.

En primer lugar, hay que indicar que los resultados muestran que el entrenamiento con peso libre, causa importantes niveles de fatiga muscular en los sujetos. Con respecto a la

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

disminución de las diferentes categorías del salto vertical (SJ y CMJ), se ha mostrado que con este entrenamiento, se produce un descenso del rendimiento. Ésto es debido, a que además de estar levantando su propio peso corporal, está levantando una carga externa, por lo que partimos de que el entrenamiento de la fuerza genera unos índices de fatiga neuromuscular. Sánchez-Medina y González-Badillo (2011), observaron en su estudio una disminución en la capacidad de salto, así como en la velocidad de movimiento tras la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza con peso libre en el ejercicio de sentadillas. Resultados similares se obtuvieron en el estudio de Brazo-Sayavera et al. (2017), en el que vieron como tras la realización de 1 serie de 45 saltos al bloqueo en voleibol, se obtenía una pérdida de rendimiento en SJ con respecto al inicio del entrenamiento. Asimismo, Krcmár et al. (2021), compararon los efectos agudos en el rendimiento de SJ y CMJ tras un protocolo de entrenamiento de fuerza en sentadillas, con o sin banda elástica. Sus resultados nos indican que el entrenamiento de fuerza (85% 1RM), combinado y no con una banda elástica, genera un descenso en el rendimiento en la capacidad de salto (SJ). Por tanto, se observa que el entrenamiento de fuerza hipertrofia generó un descenso en el rendimiento debido a la fatiga localizada directamente en la musculatura del cuádriceps, e indirectamente en el resto de musculatura del tren inferior. Además, el entrenamiento con peso libre, ha mostrado un importante cambio en la variable de dolor muscular, ya que el entrenamiento de fuerza ha demostrado que provoca un aumento del dolor muscular percibido (Andrade et al., 2021).

Con respecto a la variable de la dinamometría de piernas, también se encontraron diferencias significativas entre los valores iniciales y finales. Al igual que en las categorías de las variables de los saltos verticales (SJ y CMJ), esa disminución de los resultados al finalizar el entrenamiento en el resto de variables, nos indica que este protocolo de entrenamiento con peso libre genera fatiga. La prueba de dinamometría de piernas, resultó ser muy interesante para analizar si el tiempo de sobrecarga excéntrica afecta o no a la fatiga aguda neuromuscular. En este sentido, sí encontramos diferencias importantes en los resultados entre el inicio y el final del protocolo con peso libre, de manera que podemos interpretar, que la musculatura isquiotibial también ha generado una pérdida de rendimiento a consecuencia de la fatiga. En un estudio de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Santagnello et al. (2020), analizaron los efectos y adaptaciones producidas en la potencia, fuerza isométrica, tras un entrenamiento de fuerza (80% 1RM) en varios ejercicios del tren inferior. Los resultados de este estudio, coinciden con los obtenidos en nuestro estudio, donde el propio entrenamiento con cargas genera una fatiga muscular a consecuencia del descenso de fuerza isométrica de la musculatura isquiotibial reflejada a través de la prueba de dinamometría de piernas entre otras pruebas, así como una mejora del rendimiento tras 12 semanas.

Por otro lado, las variables de RPE y FC, también mostraron modificaciones entre el inicio y el final del entrenamiento con peso libre. La percepción subjetiva de esfuerzo ha ido en aumento a lo largo de las diferentes series por lo que se puede interpretar una fatiga progresiva a lo largo del entrenamiento. Cavarretta et al. (2022), investigaron en levantadores jóvenes, como afecta la RPE en el entrenamiento con cargas, y observaron que según aumenta la carga de entrenamiento (50 a 100% 1 RM), va aumentando la RPE de manera progresiva. Al igual que en nuestro estudio, el entrenamiento con cargas submáximas en peso libre, hace que aumente la RPE de los deportistas. Igualmente, Lea et al. (2021), concluyeron que la RPE se incrementaba progresivamente a través de la sentadilla isométrica cada 30 segundos. Boffey et al. (2021), analizaron determinadas variables de rendimiento entre las que hacían mención a la RPE. En su estudio, comprobaron que tras la aplicación de un entrenamiento con cargas con peso libre, la RPE aumentaba significativamente durante el mismo. Es por ello, por lo que estos resultados se encuentran en sintonía con los obtenidos en nuestro estudio, donde el propio entrenamiento de fuerza genera una percepción de esfuerzo progresiva en los sujetos a lo largo del mismo. Con respecto a la FC, también podemos observar en ambos protocolos, el aumento de la misma en cada una de las series, mostrando un valor final superior en la última serie. Al aplicar un estímulo o carga externa al organismo, se aumenta la FC y con ello la frecuencia respiratoria haciendo que el músculo solicite más oxígeno para poder continuar. En la misma línea, Lea et al. (2021) indicaron que el entrenamiento isométrico hace aumentar la FC significativamente tras 30 segundos, haciendo ver que el entrenamiento de fuerza es directamente proporcional al aumento de la FC. Adicionalmente, otros estudios observaron aumentos de la FC y respiratoria tras la realización de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza, tanto en un protocolo tradicional (Boffey et al.,

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

2021), como en un protocolo que combinaba ejercicios de sentadilla (estática y dinámica) con ejercicios vibratorios (Lage et al., 2019).

Con respecto al entrenamiento isoinercial, se han observado un aumento importante y significativo de la fatiga muscular de los sujetos experimentales. Se ha mostrado que el entrenamiento isoinercial produce un descenso del rendimiento en el salto vertical (SJ y CMJ). En este tipo de protocolo isoinercial, además de estar levantando su propio peso corporal, el sujeto tiene que mover un disco de inercia ($0.050 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) a una velocidad máxima, y luego soportar su retroceso en la fase excéntrica del movimiento. Kowalchuk y Butcher (2019) recalcan que el entrenamiento excéntrico, es un potente estímulo para mejorar la fuerza y la potencia en personas mayores. Asimismo, estos autores afirman que el entrenamiento con peso libre tiene una capacidad limitada durante el descenso en la fase excéntrica del movimiento. Es por ello por lo que el entrenamiento excéntrico puede superar estas limitaciones, produciendo unas grandes adaptaciones tanto en jóvenes como en personas mayores. Sabido et al. (2020), analizaron diferentes variables de rendimiento entre las que se encontraba la potencia concéntrica y excéntrica en el ejercicio de sentadillas en una máquina isoinercial con diferentes discos de inercia ($0.025 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ y $0.075 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$). Sus resultados coinciden con los de nuestro estudio, donde en cada una de las intensidades (discos de inercia) se, obtuvieron descensos significativos en la potencia muscular, entre el inicio y el final del protocolo. Aunque en nuestra investigación se utilizara una intensidad intermedia de los discos de inercia ($0.050 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), también se han obtenido resultados similares. Estos resultados concuerdan con los de nuestro estudio, puesto que nosotros también hemos utilizado 1 minuto de descanso entre series, resultando insuficiente para mantener los niveles de velocidad y potencia en los saltos verticales. Otro estudio similar fue el de Gathercole et al. (2015), en el que analizaron la fatiga aguda en deportistas de élite de snowboard a través de la aplicación de un entrenamiento isoinercial fatigante en el tren inferior. Al finalizar la sesión de entrenamiento, se produjo un descenso en los valores de CMJ. En esta misma línea, Pedersen et al. (2021), realizaron un estudio muy interesante relacionado con la fatiga muscular en jugadores de fútbol amateurs. En este caso, se comparaba en una única sesión, el nivel de activación muscular de los isquiotibiales, utilizando una máquina isoinercial (leg curl excéntrica) o el ejercicio de

nordic hamstring (5 repeticiones cada ejercicio). Los resultados nos indican, que ambos ejercicios produjeron similares resultados de activación durante las contracciones excéntricas. Sin embargo, en las contracciones concéntricas, el entrenamiento isoinercial produjo activaciones más altas, lo que puede relacionarse con un mayor índice de fatiga muscular. Ésto es debido, a la utilización de un dispositivo isoinercial, que pese a no ser el mismo utilizado por nosotros (Yoyo Squat), esta herramienta genera unas importantes activaciones en ambas acciones musculares, lo que podría producir una mayor fatiga muscular aguda en el deportista.

El entrenamiento isoinercial también produjo un importante cambio en la variable de dolor muscular. Se ha observado que la contracción excéntrica, produce una alta tensión muscular, que conlleva una percepción de dolor muscular alto tras el ejercicio. Baker et al. (1997), demostraron en su estudio, que el ejercicio excéntrico produce dolor muscular agudo y localizado en la unión musculo-tendinosa de la musculatura del cuádriceps, así como una aparición de DOMS entre las 24 y 72 horas después del ejercicio.

Centrándonos ahora en la variable de la dinamometría de piernas, también se encontraron diferencias significativas entre los valores iniciales y finales. Esta disminución de los resultados tras el protocolo de entrenamiento, nos indicaría que el entrenamiento isoinercial, ha generado fatiga y produce una pérdida de fuerza del tren inferior. Guruhan et al. (2021), nos indican que el entrenamiento excéntrico, independientemente del ejercicio, genera una activación importante y significativa en la musculatura isquiotibial. Asimismo, Carvalho et al. (2014) en su estudio, mostraron que en el entrenamiento excéntrico, genera una fatiga muscular localizada en los extensores de rodilla y con ello, unas adaptaciones en el organismo, lo que va a generar una mejora en el rendimiento.

Asimismo, las variables de RPE y FC, aumentaron a lo largo del entrenamiento isoinercial, observándose diferencias entre antes y después del mismo. En el estudio de Tesch et al. (2013)

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

también se observó un aumento de la RPE y la FC a lo largo de las series, al realizar un protocolo de entrenamiento en un remo isoinercial. Igualmente, Sabido et al. (2020), también mostraron un aumento de la RPE durante las series de sentadillas con diferentes discos de inercia (0.025 kg*m² y 0.075 kg*m²). Con respecto a la FC, diferentes estudios han mostrado aumentos de la FC tras la realización de un entrenamiento con sobrecarga excéntrica. Boullosa et al. (2021), analizaron diferentes variables de rendimiento tanto en una prueba concéntrica como excéntrica en bicicleta, entre las cuales destacamos la FC. En este sentido, al finalizar ambos entrenamientos, se obtuvieron aumentos significativos en dicha variable, siendo este aumento mayor en el entrenamiento concéntrico. Por tanto, podemos decir que la FC se aumenta a través de ambos entrenamientos, así como en la combinación de ambos como hemos realizado en nuestro estudio. Por otro lado, Zubac et al. (2021), también estudiaron el efecto de la FC tras un protocolo de entrenamiento isoinercial. En este sentido, la FC aumentó progresivamente a lo largo de las diferentes series en ambos sexos, por lo que interpretamos que al igual que en nuestro estudio, el entrenamiento isoinercial, solicita un aumento progresivo de las pulsaciones a lo largo del entrenamiento. Asimismo, Tesch et al. (2013), realizaron un estudio en el que analizaron una serie de parámetros fisiológicos, entre ellos la FC, ante un entrenamiento con un remo isoinercial. Sus resultados, al igual que en nuestro estudio, nos indican que conforme aumentan las series y con ellas la fatiga muscular, aumenta la FC. Zubac et al. (2020), también encontraron aumentos en la FC tras la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza excéntrica en sentadillas, con diferentes discos de inercia (0.025, 0.050 y 0.075kg*m²) en sujetos de diferentes edades (20-55 años).

Centrándonos ahora en las diferencias Intergrupos, los resultados nos indican que existen diferencias significativas al comparar los resultados obtenidos tras el protocolo tradicional con peso libre y el protocolo isoinercial. El entrenamiento isoinercial con sobrecarga excéntrica, causó mayores descensos del rendimiento en los saltos verticales (SJ y CMJ) que el entrenamiento tradicional. Esta mayor pérdida de rendimiento en el entrenamiento isoinercial, puede deberse a que existe una sobrecarga excéntrica, provocando un aumento del tiempo bajo tensión del cuádriceps (Gepfert et al., 2021). Sin embargo, Timón et al. (2018), analizaron los efectos

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

producidos en la saturación de oxígeno en el músculo tras un entrenamiento con peso libre frente a un entrenamiento isoinercial con máquina yo-yo en el ejercicio de sentadillas, mostraron que no hubo diferencias significativas en las variables de saltos verticales entre ambos protocolos. Estos resultados, podrían diferir de los obtenidos en nuestro estudio porque el entrenamiento de fuerza utilizado por Timón et al. (2018), no fue tan exigente como el nuestro, al trabajar a 8 repeticiones en comparación con nuestro estudio, que fue a 15 repeticiones con una carga similar. Por otro lado, Alkner y Bring (2019), analizaron la activación muscular concéntrica y excéntrica en la musculatura del cuádriceps durante la realización de un ejercicio de fuerza con diferentes medios de entrenamiento. Los participantes tuvieron que realizar 8 repeticiones concéntricas y excéntricas, ejecutadas en máquina isoinercial, en máquina isocinética, con peso libre o máquina de extensión de piernas. Los resultados de este estudio, indicaron que el entrenamiento isoinercial y el entrenamiento en máquina isocinética mostraron una EMG mayor que el resto de medios, sobretodo en fase excéntrica. Estos datos nos podrían indicar que el protocolo isoinercial, resultó ser de los que mayor activación producían, lo que puede estar relacionado con una mayor fatiga muscular.

Adicionalmente, en un estudio comparativo realizado por Chiu y Salem (2006), se analizó la cinética de las articulaciones tanto en el entrenamiento con peso libre como con el entrenamiento isoinercial. Para ello, se seleccionaron los ejercicios de la sentadilla frontal, realizado con una máquina isoinercial, el cual requirió una mayor contribución de la cadera y del tobillo y menos de la rodilla a diferencia del peso libre. Estos resultados difieren de los nuestros ya que el entrenamiento isoinercial generó un descenso del rendimiento a consecuencia de la fatiga muscular localizada en la musculatura del cuádriceps. Esta disparidad de resultados puede deberse a que en nuestra investigación, se utilizó una plataforma Yoyo Squat, y en el estudio de Chiu y Salem (2006), utilizaron un cono isoinercial, lo que pudo modificar en alguna medida la técnica y mecánica de ejecución.

Sin embargo, el resto de variables analizadas (dolor muscular, dinamometría, FC y REP),

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

presentaron resultados aparentemente similares en los dos entrenamientos. Estudios previos han mostrado resultados similares a los nuestros al comparar la RPE de un entrenamiento tradicional con el de un entrenamiento isoinercial (Floreani et al., 2021; Timón et al., 2018). Por tanto, se podría pensar que otros factores tales como la intensidad, el volumen o la recuperación entre las series, podrían ser más determinantes que el medio de entrenamiento para alterar los niveles de RPE (Morishita et al., 2019). En la misma línea, Tesch et al. (2013) realizaron un estudio en el que analizaron diferentes variables fisiológicas y de rendimiento en diferentes protocolos de entrenamiento (entrenamiento isoinercial o levantamiento de carga frente a la gravedad), y tampoco observaron diferencias entre ellos en FC y RPE (con valores medios próximos a las 140 ppm). Sin embargo en el estudio de Timón et al. (2018), sí se encontraron diferencias significativas en la FC, pudiendo ser debido a la utilización de un protocolo de entrenamiento diferente.

Por otro lado, tampoco se observaron diferencias entre los entrenamientos en los valores obtenidos en el test de fuerza isométrica del tren inferior. Dado que sí se observaron diferencias en los valores de SJ y CMJ, esta falta de diferencia en la fuerza isométrica del tren inferior, podría resultar llamativa. Se podría pensar que este test no fue demasiado sensible para detectar la fatiga del cuádriceps, ya que pudo ser compensada por la implicación de otros grupos musculares no implicados en el entrenamiento, pero que sí podrían actuar como sinergistas en el test de fuerza del tren inferior. Timón et al. (2018), tampoco encontraron diferencias significativas entre el entrenamiento con peso libre y entrenamiento isoinercial, lo que serviría para apoyar los resultados de nuestro estudio.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

CONCLUSIONES



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

6. CONCLUSIONES.

6.1. ESTUDIO 1.

- Una sesión aguda de entrenamiento de fuerza con peso libre o peso guiado, genera una fatiga aguda neuromuscular localizada en el tren inferior, haciendo disminuir de forma inmediata el rendimiento deportivo.
- Una sesión aguda de entrenamiento de fuerza con peso libre o peso guiado combinado con EMS en cuádriceps, genera una fatiga aguda neuromuscular localizada en el tren inferior, haciendo disminuir de forma inmediata el rendimiento deportivo.
- El entrenamiento de la fuerza con peso libre o guiado que combina o no con la EMS localizada, llevada a cabo en la investigación a través de la metodología Clúster, genera unos estímulos en el organismo, que se traducen en una fatiga neuromuscular localizada en el tren inferior. El porcentaje de carga estimada (70% 1RM) para todos los medios de entrenamiento, ha mostrado unos índices muy similares de fatiga muscular. En este sentido, la aplicación de EMS en el entrenamiento de fuerza, no fue lo suficientemente intensa (máxima soportada por el sujeto) como para generar una mayor fatiga muscular y con ello un descenso en el rendimiento de los deportistas.
- La metodología Clúster en un entrenamiento de fuerza hipertrofia, ha permitido aumentar el volumen del entrenamiento, retrasando la aparición de la fatiga muscular y pudiendo con ello, realizar un mayor número de repeticiones con intensidades submáximas (70% 1RM). Todo ello, independientemente de la combinación o no de EMS máxima soportada por el sujeto. Por tanto, podemos interpretar que ante la aplicación de cargas submáximas (hipertrofia) con metodología clúster, en diferentes medios de entrenamiento, se obtendrán resultados similares en relación a la fatiga aguda neuromuscular, siendo esto muy interesante para los entrenadores y preparadores físicos, puedan aplicar correctamente las cargas de entrenamiento.

6.2. ESTUDIO 2.

- Una sesión aguda de entrenamiento de fuerza hipertrófica con peso libre, genera una fatiga aguda neuromuscular localizada en el tren inferior, haciendo disminuir de forma inmediata el rendimiento deportivo.
- Una sesión aguda de entrenamiento de fuerza isoinercial en una plataforma Yoyo, genera una fatiga aguda neuromuscular localizada en el tren inferior, haciendo disminuir de forma inmediata el rendimiento deportivo.
- Los entrenamientos de la fuerza hipertrófica con peso libre e isoinercial (Yoyo Squat), generan unos estímulos en el organismo, que se traducen en una fatiga aguda neuromuscular localizada en el tren inferior. Asimismo, esta fatiga aguda, provoca un descenso en el rendimiento del deportista, siendo significativamente mayor en el entrenamiento isoinercial o excéntrico, sobre todo en la capacidad de salto. Por tanto, pese a que ambos entrenamientos de hipertrofia, generan una fatiga aguda en el tren inferior, el entrenamiento isoinercial muestra una mayor exigencia ante cargas similares. De esta manera, los entrenadores y preparadores físicos de determinados deportes, podrán conocer los efectos agudos que genera un entrenamiento isoinercial, para su posterior aplicación de las cargas de entrenamiento.

A nivel global, podemos concluir con unas ideas muy concretas en relación al entrenamiento de hipertrofia y la fatiga aguda neuromuscular. El entrenamiento tradicional con peso libre, ha sido el entrenamiento por excelencia en la preparación física como factor clave en el rendimiento deportivo. Sin embargo, con el paso de los años y las nuevas actualizaciones en el entrenamiento de la fuerza por parte de las constantes investigaciones en dicho campo, los entrenadores, disponen en su haber, de una gran variedad de medios de entrenamientos tales como la EMS, isoinercial, vibración, etc., que pueden dar unos estímulos diferentes tanto beneficiosos como perjudiciales para el rendimiento. Por tanto, saber cómo son y cómo se presentan los efectos agudos en el entrenamiento de la fuerza, a través de la combinación de estos medios materiales, resulta muy interesante para estos profesionales del ejercicio físico, de

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

manera que podrán aplicar de una manera más eficiente las cargas, para aumentar su volumen de entrenamiento y con ello una mejora en el rendimiento.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

APLICACIONES PRÁCTICAS



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

7. APLICACIONES PRÁCTICAS.

Los resultados obtenidos en estos estudios, nos indican que el entrenamiento de la fuerza, independientemente del medio utilizado, genera una fatiga aguda neuromuscular en el organismo. Esto, nos facilita identificar qué medios de entrenamientos son los más adecuados para programar correctamente a los deportistas. Actualmente, existen numerosos medios o materiales de entrenamiento, que nos facilitan la adquisición de una capacidad o habilidad, haciéndolos mejorar. Por todo ello, el conocer los métodos de entrenamiento y sus efectos, así como la combinación con estos medios, resulta fundamental para el entrenador o preparador físico, de manera que pueda aplicar y proporcionar unas correctas cargas de entrenamiento teniendo en cuenta la fatiga aguda neuromuscular.

Por tanto, estos resultados aportan unos conocimientos muy concretos en relación a la fatiga aguda neuromuscular con el entrenamiento de la fuerza en cargas submáximas, dando una información muy específica a los entrenadores y preparadores físicos para programar sus entrenamientos orientados a cada deportista.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

La presente Tesis Doctoral, debe servir de referencia y consulta para futuros trabajos de investigación relacionados con esta temática u objeto de estudio. Las posibilidades de futuras líneas de investigación son ilimitadas, gracias a la gran versatilidad de la temática, de la variedad de los métodos de entrenamiento, así como la constante creación e innovación de los medios de entrenamientos. A continuación se exponen las siguientes recomendaciones para los futuros trabajos.

- Aumentar la intensidad o carga de entrenamiento tanto en peso libre como en peso guiado e identificar si con una mayor carga, se darían diferencias entre peso libre y peso guiado.
- Realizar el mismo estudio para el ejercicio del peso muerto o similar que implique la musculatura isquiotibial, y con ello ver los valores que relacionen la fatiga muscular con o sin la combinación de EMS.
- Desarrollar un entrenamiento de fuerza isoinercial con metodología Clúster, para identificar como puede aumentar el volumen de entrenamiento en este medio tan fatigante.
- Utilizar y comparar la fatiga muscular con otros medios materiales del mercado, como el entrenamiento vibratorio con plataforma vibratoria PowerPlate® o el entrenamiento pliométrico con resistencia externa a través del dispositivo Vertimax®.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

LIMITACIONES



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

9. LIMITACIONES.

Con respecto a las limitaciones que hemos encontrado en el desarrollo del estudio, han sido las dificultades para conseguir a sujetos con unas características muy concretas, así como la disponibilidad para llevar a cabo las mediciones.

Asimismo, los sujetos debían someterse a una corriente de intensidad máxima soportada, dando la posibilidad de que pudieran exigirse algo más, por miedo a no superar la repetición marcada. Los sujetos tienen una gran experiencia en el entrenamiento con cargas, pero no tanto en la utilización de EMS como trabajo combinado.

Con respecto a la variable de dolor muscular percibido, también fue otra limitación, ya que al ser una valoración subjetiva, podrían indicar terminar dicha prueba por miedo al dolor por presión local al no estar tan familiarizado con ese tipo de mediciones.

En relación al entrenamiento isoinercial, aunque los sujetos se familiarizaron bien, había que enseñar muy bien el funcionamiento del mismo, para no dejar libre la tensión del cable que se enrolla en el disco en la fase excéntrica, debiendo estar siempre pendiente de la buena realización de la práctica. Asimismo, se ha asumido que la carga o disco isoinercial en el entrenamiento excéntrico, era equivalente a la carga estimada en el entrenamiento tradicional con peso libre, y quizás no fuera así.

Por otro lado, otra limitación podría ser la elección de los instrumentos de evaluación llevados a cabo durante las mediciones. En este caso, se podrían haber realizado otras evaluaciones como la utilización de la velocidad de movimiento durante el propio entrenamiento, la valoración del ratio de desarrollo de fuerza en el tiempo o incluso la valoración de la fuerza en la máquina isocinética, y con ello, tener una información más exhaustiva y precisa.

Por último, y teniendo en cuenta las limitaciones económicas por escaso presupuesto, se podrían haber realizado a los sujetos unas analíticas de sangre, con el objetivo de valorar los biomarcadores sanguíneos de esfuerzo (CPK, amonio, lactato, deshidrogenasa, urea, hormonas catabólicas, etc.)

BIBLIOGRAFÍA



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

10. BIBLIOGRAFÍA.

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, S. P., Halkjaer-Kristensen, J., & Dyhre-Poulsen, P. (2000). Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction: effect of resistance training. *Journal of Applied Physiology*, 89(6), 2249-2257.
- Aagaard, P., Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A. M., Wagner, A., Magnusson, S. P., Halkjaer-Kristensen, J., & Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *Journal of Physiology*, 534(2), 613-623.
- Aagaard, P., Magnusson, P. S., Larsson, B., Kjær, M., & Krstrup, P. (2007). Mechanical muscle function, morphology and fibertype in life-long trained elderly. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 1989-1996.
- Abadie, B. R., Altorfer, G. L., & Schuler, P. R. (1999). Does a regression equation to predict maximal strength in untrained lifters remain valid when the subjects are technique trained? *Journal of Strength Condition Research*, 13(3), 259-263.
- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2005). Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Medicine*. 35(10), 865-98.
- Abbott, B. C., Bigland, B., & Ritchie, J. M. (1952). The Physiological cost of negative work. *Journal of Physiology*, 117 (3), 380-390.
- Adams, G. M. (1998). *Exercise Physiology laboratory manual*. McGraw Hill.
- Alexiou, H., & Coutts, A. J. (2008). A comparison of methods used for quantifying internal training load in women soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(3), 320-330.
- Alkner, B. A., & Bring, D. K. (2019). Muscle Activation During Gravity-Independent Resistance Exercise Compared to Common Exercises. *Aerospace Medicine Human Performance*, 90(6), 506-512.

- Allen, D. G., Lannergren, J., & Westerblad, H. (1995). Muscle cell function during prolonged activity: Cellular mechanisms of fatigue. *Experimental Physiology*, 80(4), 497-527.
- Allen, D. G. (2001). Eccentric muscle damage: mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(3), 311-319.
- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiological Reviews*, 88, 287-332.
- Allen, D. G., & Trajanovska, S. (2012). The multiple roles of phosphate in muscle fatigue. *Frontiers in Physiology*, 3, 463.
- Alon, G., & Smith, G. (2005). Tolerance and conditioning to neuro-muscular electrical stimulation within and between sessions and gender. *Journal of sports Science and Medicine*, 4, 395-405.
- Alonso, D., Forjaz, M., Rezende, O., Braga, A., Barreto, A., Negrão, C., & Rondon, M. (1998). Comportamento da frequência cardíaca e da sua variabilidade durante as diferentes fases do exercício físico progressivo. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 71(6), 787-792.
- Aminaei, M., Yazdani, S., & Amirseifadini, M. (2017). Effects of plyometric and cluster resistance training on explosive power and maximum strength in karate players. *International Journal of Applied Exercise Physiology*, 6(2), 34-44.
- Annibalini, G., Contarelli, S., Lucertini, F., Guescini, M., Maggio, S., Ceccaroli, P., Gervasi, M., Ferri-Marini, C., Fardetti, F., Grassi, E., Stocchi, V., Barbieri, E., & Benelli, P. (2019). Muscle and Systemic Molecular Responses to a Single Flywheel Based Iso-Inertial Training Session in Resistance-Trained Men. *Front. Physiological Reviews*, 10, 554.
- Apkarian, M. R. (2019). Acute Heart Rate Responses to Resistance Exercise at Different Cadences. *International Journal of Sports and Exercise Medicine*, 5, 143.
- Arazi, H., Khanmohammadi, A., Asadi, A., & Haff, G. G. (2018). The effect of resistance training set configuration on strength, power, and hormonal adaptation in female volleyball players. *Applied physiology, nutrition, and metabolism*, 43(2), 154-164.
- Arazi, H., Khoshnoud, A., Asadi, A., & Tufano, J. J. (2021). The effect of resistance training set configuration on strength and muscular performance adaptations in male powerlifters. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Asadi, A., & Ramirez-Campillo, R. (2016). Effects of cluster vs traditional plyometric training sets on maximal-intensity exercise performance. *Medicina*, 52(1), 41–45.
- Askling, C., Karlsson, J., & Thorstensson, A. (2003). Hamstring injury occurrence in elite soccer players after strength training with eccentric overload. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 13(4), 244-250.
- Asmussen, E., & Bonde-Petersen, F. (1974). Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *Acta Physiologica Scandinava*, 92(4), 537-545.
- Aubry, A., Hausswirth, C., Louis, J., Coutts, A. J. & Le Meur, Y. (2014). Functional overreaching: the key to peak performance during the taper? *Medicine and Sciences of Sports and Exercise*, 46(9), 1769-1777.
- Babault, N., Cometti, G., Bernardin, M., Pousson, M., Chatard, J. C. (2007). Effects of electromyostimulation training on muscle strength and power of elite rugby players. *The Journal Strength & Conditioning Research*, 21(2), 431–437.
- Baechle, T. R., & Earle, T. W. (2000). *Essentials of strength training and conditioning*. Human Kinetics.
- Baker, S.J., Kelly, N. M., & Eston, R. G. (1997). Pressure pain tolerance at different sites on the quadriceps femoris prior to and following eccentric exercise. *European Journal of Pain*, 1(3), 229-233.
- Bangsbo, J. (2000). *Nutrition in Sport*. Oxford BSL.
- Bangsbo, J., Mohr, M., & Krstrup, P. (2006). Physical and metabolic demands of training and match-play in the elite football player. *Journal of Sports Sciences*, 24(07), 665-674.
- Barbany, J. R. (2006). *Fisiología del ejercicio físico y del entrenamiento*. Paidotribo.
- Barnes, T. C., & Mauer, I. (1946). Bioelectrical studies of fatigue; recovery of fatigued polarized muscle by reversal of the poles of the galvanic current. *Federation Proceedings*, 5(1), 5.
- Baudry, S., Klass, M., Pasquet, B., & Duchateau, J. (2007). Age-related fatigability of the ankle dorsiflexor muscles during concentric and eccentric contractions. *European Journal of Applied Physiology*, 100(5), 515-525.
- Bax, L., Staes, F., & Verhagen, A. (2005). Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris?. *Sports medicine*, 35(3), 191-212.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Beato, M., Bigby, A. E., De Keijzer, K. L., Nakamura, F. Y., Coratella, G., & McErlain-Naylor, S. A. (2019). Post-activation potentiation effect of eccentric overload and traditional weightlifting exercise on jumping and sprinting performance in male athletes. *PLoS one*, *14*(9), e0222466.
- Belcher, D. J., Sousa, C. A., Carzoli, J. P., Johnson, T. K., Helms, E. R., Visavadiya, N. P., Zoeller, R. F., Whitehurts, M., & Zourdos, M. C. (2019). Time course of recovery is similar for the back squat, bench press, and deadlift in well-trained males. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *44*(10), 1033-1042.
- Benito-Martínez, E., Lara Sánchez, A. J., Berdejo del Fresno, D., & Martínez López, E. J. (2011). Effects of combined electrostimulation and plyometric training on vertical jump and speed tests. *Journal of Human Sport and Exercise*, *6*(4), 603-615. <https://doi.org/10.4100/jhse.2011.64.04>
- Berg, H. E., & Tesch, P. A. (1994). A gravity-independent ergometer to be used for resistance training in space. *Aviation, space, and environmental medicine*, *65*(8), 752-756.
- Berg, H. E., & Tesch, P. A. (1998). Force and power characteristics of a resistive exercise device for use in space. *Acta Astronautica*, *42*(1-8), 219-230.
- Berger, R. A. (1961). Determination of the resistance load for 1-RM and 10-RM. *Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, *15*, 108-110.
- Berger, R. A. (1970). Relationship between dynamic strength and dynamic endurance. *Research Quarterly*, *41*(1), 115-116.
- Bird, S. P., Tarpenning, K. M., & Marino, F.E. (2005). Designing Resistance Training Programmes to Enhance Muscular Fitness. *Sports Medicine* *35*(10), 841-851.
- Bobbert, M. F., & Casius, L. J. (2005). Is the effect of a countermovement on jump height due to active state development. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *37*(3), 440-446.
- Boeckh-Behrens, W. U., & Buskies, W. (2004). *Entrenamiento de la fuerza*. Paidotribo.
- Boffey, D., Clark, N. W., & Fukuda, D. H. (2021). Efficacy of Rest Redistribution During Squats: Considerations for Strength and Sex. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *35*(3), 586-595.

- Bogdanis, G. C., Papaspyrou, A., Souglis, A. G., Theos, A., Sotiropoulos, A., & Maridaki, M. (2011). Effects of two different half-squat training programs on fatigue during repeated cycling sprints in soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(7), 1849-1856.
- Bojsen-Møller, J., Magnusson, S. P., Rasmussen, L. R., Kjaer, M., & Aagaard, P. (2005). Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *Journal of Applied Physiology*, 99(3), 986-994.
- Bompa, T. O. (2003). *Periodización. Teoría y metodología del entrenamiento*. Hispano Europea.
- Bond, V., Adams, R. G., Tearney, R. J., Gresham, K., & Ruff, W. (1991). Effects of active and passive recovery on lactate removal and subsequent isokinetic muscle function. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 31(3), 357-361.
- Borg, E., & Borg, G. (2002). A comparison of AME and CR100 for scaling perceived exertion. *Acta Psychologica*, 109(2), 157-175.
- Borg, E., & Kaijser, L. (2006). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 16(1), 57-69.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2(2), 92-98.
- Borg, G. (1998). *Borg's Perceived Exertion and Pain Scales*. Human Kinetics.
- Borg, G., & Noble, B. J. (1974). Perceived exertion. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 2(1), 131-154.
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Quantifying training load: a comparison of subjective and objective methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(1), 16-30.
- Boschetti, G. (2002). *¿Qué es la electroestimulación? Teoría, práctica y metodología del entrenamiento*. Paidotrabó.
- Bougard, P. (1989). *Fatigue et les états asthéniques*. Doin Editeurs.
- Boullosa, D. A., Abreu, L., Beltrame, L. G., & Behm, D. G. (2013). The acute effect of different half squat set configurations on jump potentiation. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(1), 1-10.
- Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla*

- Conditioning Research*, 27(8), 2059-2066.
- Boullosa, D. A., Dragutinovic, B., Deutsch, J. P., Held, S., Donath, L., Bloch, W., & Schumann, M. (2021). Acute and Delayed Effects of Time-Matched Very Short “All Out” Efforts in Concentric vs. Eccentric Cycling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), 7968.
- Brazo-Sayavera, J., Nikolaidis, P. T., Camacho-Cardenosa, A., Camacho-Cardenosa, M., Timón, R., & Olivares, P. R. (2017). Acute effects of block jumps in female volleyball players: The role of performance level. *Sports*, 5(2), 30.
- Brinckmann, P., Frobin, W., & Leivseth, G. (2002). *Musculoskeletal Biomechanics*. Thieme.
- Brink, M. S., Nederhof, E., Visscher, C., Schmikli, S. L., & Lemmink, K. A. (2010). Monitoring load, recovery, and performance in young elite soccer players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(3), 597-603.
- Brocherie, F., Babault, N., Cometti, G., Maffiuletti, N., & Chatard, J. C. (2005). Electrostimulation training effects on the physical performance of ice hockey players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(3), 455-460.
- Broich, H., Sperlich, B., Buitrago, S., Mathes, S., & Mester, J. (2012). Performance assessment in elite football players: field level test versus spiroergometry. *Journal of Human Sport and Exercise*, 7(1), 287-295.
- Brown, G. L., & Burns, B. D. (1949). Fatigue and neuromuscular block in mammalian skeletal muscle. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B-Biological Sciences*, 136(883), 182-195.
- Brzycki, M. (1993). Strength testing—predicting a one-rep max from reps-to-fatigue. *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 64(1), 88-90.
- Buchheit, M., Voss, S. C., Nybo, L., Mohr, M., & Racinais, S. (2011). Physiological and performance adaptations to an in-season soccer camp in the heat: Associations with heart rate and heart rate variability. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), e477-e485.
- Buchheit, M., Simpson, M. B., Al Haddad, H., Bourdon, P. C., & Mendez-Villanueva, A. (2012).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 112(2), 711-723.
- Buitrago, S., Wirtz, N., Yue, Z., Kleinöder, H., & Mester, J. (2012). Effects of load and training modes on physiological and metabolic responses in resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 112(7), 2739-2748.
- Cairns, S. P. (2006). Lactic acid and exercise performance. *Sports medicine*, 36(4), 279-291.
- Cairns, S. P., & Lindinger, M. I. (2008). Do multiple ionic interactions contribute to skeletal muscle fatigue?. *The Journal of Physiology*, 586(17), 4039-4054.
- Cannell, L. J., Taunton, J. E., Clement, D. B., Smith, C., & Khan, K. M. (2001). A randomised clinical trial of the efficacy of drop squats or leg extension/leg curl exercises to treat clinically diagnosed jumper's knee in athletes: pilot study. *British Journal of Sports Medicine*, 35(1), 60-64.
- Caruso, J. F., Hernandez, D. A., Saito, K., Cho, M., & Nelson, N. M. (2003). Inclusion of eccentric actions on net caloric cost resulting from isoinertial resistance exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 17(3), 549-555.
- Casáis Martínez, L. (2008). Revisión de las estrategias para la prevención de lesiones en el deporte desde la actividad física. *Apunts Sports Medicine*, 43(157), 30-40.
- Cavarretta, D. J., Hall, E. E., & Bixby, W. R. (2022). The effects of increasing training load on affect and perceived exertion. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 36(1), 16-21.
- Chiu, L. Z., & Salem, G. J. (2006). Comparison of joint kinetics during free weight and flywheel resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(3), 555.
- Clark, B. C., Collier, S. R., Manini, T. M., & Ploutz-Snyder, L. L. (2005). Sex differences in muscle fatigability and activation patterns of the human quadriceps femoris. *European Journal of Applied Physiology*, 94(1), 196-206.
- Clarkson, P. M., Nosaka, K., & Braun, B. (1992). Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(5), 512-520.
- Colliander, E. B., & Tesch, P. A. (1990). Effects of eccentric and concentric muscle actions in resistance training. *Acta Physiologica Scandinavica*, 140(1), 31-39.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Coratella, G., Beato, M., Cè, E., Scurati, R., Milanese, C., Schena, F., & Esposito, F. (2019). Effects of in-season enhanced negative work-based vs traditional weight training on change of direction and hamstrings-to-quadriceps ratio in soccer players. *Biology of Sport*, 36(3), 241.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing Maximal Neuromuscular Power: Part 2—Training Considerations for Improving Maximal Power Production. *Sports Medicine*, 41(2), 125-146.
- Coyle, E. F. (1991). *La fatigues musculaire: aspect biochimiques et physiologiques*. Masson.
- Cuenca-Fernández, F., López-Contreras, G., & Arellano, R. (2015). Effect on swimming start performance of two types of activation protocols: lunge and YoYo squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(3), 647-655.
- Cuevas-Aburto, J., Jukic, I., Chiroso-Ríos, L. J., González-Hernández, J. M., Janicijevic, D., Barboza-González, P., Guede-Rojas, F., & García-Ramos, A. (2020). Effect of Traditional, Cluster, and Rest Redistribution Set Configurations on Neuromuscular and Perceptual Responses During Strength-Oriented Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. <http://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003658>.
- Dankel, S. J., Jessee, M. B., Mattocks, K. T., Mouser, J. G., Counts, B. R., Buckner, S. L., & Loenneke, J. P. (2017). Training to fatigue: the answer for standardization when assessing muscle hypertrophy? *Sports Medicine*, 47(6), 1021-1027.
- Davies, T. B., Halaki, M., Orr, R., Helms, E. R., & Hackett, D. A. (2020). Changes in bench press velocity and power after 8 weeks of high-load cluster-or traditional-set structures. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(10), 2734-2742.
- de Hoyo, M., De La Torre, A., Pradas, F., Sañudo, B., Carrasco, L., Mateo-Cortes, J., Domínguez-Cobo, S., Fernandes, O., & Gonzalo-Skok, O. (2015a). Effects of eccentric overload bout on change of direction and performance in soccer players. *International Journal of Sports Medicine*, 36(04), 308-314.
- de Hoyo, M., Sañudo, B., Carrasco, L., Domínguez-Cobo, S., Mateo-Cortes, J., Cadenas-

- Sánchez, M. M., & Nimphius, S. (2015b). Effects of traditional versus horizontal inertial flywheel power training on common sport-related tasks. *Journal of human kinetics*, 47, 155.
- de Hoyo, M., Pozzo, M., Sañudo, B., Carrasco, L., Gonzalo-Skok, O., Domínguez-Cobo, S., & Morán-Camacho, E. (2015c). Effects of a 10-week in-season eccentric-overload training program on muscle-injury prevention and performance in junior elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10(1), 46-52.
- De Keijzer, K. L., McErlain-Naylor, S. A., Iacono, A. D., & Beato, M. (2020). Effect of Volume on Eccentric Overload–Induced Postactivation Potentiation of Jumps. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(7), 976-981.
- Deley, G., Cometti, C., Fatnassi, A., Paizis, C., & Babault, N. (2011). Effects of combined electromyostimulation and gymnastics training in prepubertal girls. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2), 520-526.
- Deley, G., Laroche, D., & Babault, N. (2014). Effects of electrical stimulation pattern on quadriceps force production and fatigue. *Muscle & Nerve*, 49(5), 760-763.
- Deley, G., Denuziller, J., Babault, N., & Taylor, J. A. (2015). Effects of electrical stimulation pattern on quadriceps isometric force and fatigue in individuals with spinal cord injury. *Muscle & Nerve*, 52(2), 260-264.
- Delitto, A., Brown, M., Strube, M. J., Rose, S. J., & Lehman, R. C. (1989). Electrical stimulation of quadriceps femoris in an elite weight lifter: a single subject experiment. *International Journal of Sports Medicine*, 10(03), 187-191.
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2018). Effects of accentuated eccentric loading on muscle properties, strength, power, and speed in resistance-trained rugby players. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(10), 2750-2761.
- Duchateau, J., & Baudry, S. (2014). Insights into the neural control of eccentric contractions. *Journal of Applied Physiology*, 116(11), 1418-1425.
- Dudley, G. A., Tesch, P. A., Harris, R. T., Golden, C. L., & Buchanan, P. (1991). Influence of eccentric actions on the metabolic cost of resistance exercise. *Aviation, space, and environmental medicine*, 62(7), 678-682.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Edwards, R. (1981). Human muscle function and fatigue. *Human muscle fatigue: physiological mechanisms*, 82, 1-18.
- Emanuel, A., Smukas, I. I. R., & Halperin, I. (2020). An analysis of the perceived causes leading to task-failure in resistance-exercises. *PeerJ*, 8, e9611.
- Enoka, R. M., & Stuart, D. G. (1992). Neurobiology of muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, 72(5), 1631-1648.
- Enoka, R. M. (1997). Neural adaptations with chronic physical activity. *Journal of Biomechanics*, 30(5), 447-455.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, 586(1), 11-23.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2016). Translating fatigue to human performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2228.
- Epley, B. (1985). *Poundage chart*. In: *Boyd Epley Workout*. Body Enterprises.
- Ettema, G. J., Huijling, P. A., van Ingen Schenau, G. J., & De Haan, A. (1990). Effects of prestretch at the onset of stimulation on mechanical work output of rat medial gastrocnemius muscle-tendon complex. *Journal of Experimental Biology*, 152(1), 333-351.
- Fang, Y., Siemionow, V., Sahgal, V., Xiong, F., & Yue, G. H. (2001). Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *Journal of Neurophysiology*, 86(4), 1764-1772.
- Fernandez-Gonzalo, R., Bresciani, G., de Souza-Teixeira, F., Hernandez-Murua, J. A., Jimenez-Jimenez, R., Gonzalez-Gallego, J., & de Paz, J. A. (2011). Effects of a 4-week eccentric training program on the repeated bout effect in young active women. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(4), 692.
- Fink, J., Kikuchi, N., & Nakazato, K. (2018). Effects of rest intervals and training loads on metabolic stress and muscle hypertrophy. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 38(2), 261-268.
- Finsterer, J. (2012). Biomarkers of peripheral muscle fatigue during exercise. *BMC musculoskeletal disorders*, 13(1), 1-13.

- Fiorilli, G., Mariano, I., Iuliano, E., Giombini, A., Ciccarelli, A., Buonsenso, A., Calcagno, G., & di Cagno, A. (2020). Isoinertial eccentric-overload training in young soccer players: Effects on strength, sprint, change of direction, agility and soccer shooting precision. *Journal of Sports Science & Medicine*, *19*(1), 213-223.
- Fitts, R. H. (2008). The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *Journal of Applied Physiology*, *104*(2), 551-558.
- Fleck, S. J., & Kraemer, W. J. (2014). *Designing resistance training programs*. Human Kinetics.
- Fletcher, W. M. (1904). The osmotic properties of muscle, and their modifications in fatigue and rigor. *The Journal of Physiology*, *30*(5-6), 414-438.
- Floreani, M., Rejc, E., Gambin, S., Vavassori, L., & Lazzer, S. (2021). Effects of gravitational and iso-inertial resistance trainings using rating of perceived exertion on lower limbs muscle force and power abilities and metabolic cost of walking in healthy older adults. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.21.12649-0>.
- Folland, J. P., Irish, C. S., Roberts, J. C., Tarr, J. E., & Jones, D. A. (2002). Fatigue is not a necessary stimulus for strength gains during resistance training. *British Journal of Sports Medicine*, *36*(5), 370-373.
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine*, *37*(2), 145-168.
- Fonseca, F. S., Costa, B. D. D. V., Ferreira, M. E. C., Paes, S., de Lima-Junior, D., Kassiano, W., S. Cyrino, E., Gantois, P., & S. Fortes, L. (2020). Acute effects of equated volume-load resistance training leading to muscular failure versus non-failure on neuromuscular performance. *Journal of Exercise Science & Fitness*, *18*(2), 94-100.
- Freitas, V. H., Nakamura, F. Y., Miloski, B., Samulski, D., & Bara-Filho, M. G. (2014). Sensitivity of physiological and psychological markers to training load intensification in volleyball players. *Journal of Sports Science & Medicine*, *13*(3), 571.
- Frohm, A., Halvorsen, K., & Thorstensson, A. (2005). A new device for controlled eccentric overloading in training and rehabilitation. *European Journal of Applied*

- Physiology*, 94(1), 168-174.
- Froyd, C., Millet, G. Y., & Noakes, T. D. (2013). The development of peripheral fatigue and short-term recovery during self-paced high-intensity exercise. *The Journal of Physiology*, 591(5), 1339-1346.
- Fukashiro, S., Kurokawa, S., Hay, D. C., & Nagano, A. (2005). Comparison of muscle-tendon interaction of human m. gastrocnemius between ankle-and drop-jumping. *International Journal of Sport and Health Science*, 3, 253-263.
- Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725-1789.
- Garagiola, U., & Giani, E. (1990). Use of telethermography in the management of sports injuries. *Sports Medicine*, 10(4), 267-272.
- García Manso, J. M., Valverde, T., Arrones, L., Navarro Valdivielso, M. E., Martin Dantas, E. H., Silva-Grigoletto, D., & Marzo, E. (2016). Effects of intra-set rest on the ability to repeat work at maximal isometric strength. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 56(3), 214-222.
- García-López, D. (2008). El entrenamiento excéntrico. Fundamentos y aplicaciones con población general y deportista. En A. Jiménez (Coord.), *Nuevas dimensiones en el entrenamiento de la fuerza: aplicación de nuevos métodos, recursos y tecnologías* (pp. 75-102). INDE.
- García-Manso, J. M. (1999). *Alto rendimiento. La adaptación y la excelencia deportiva*. Gymnos.
- García-Ramos, A., Padial, P., Haff, G. G., Argüelles-Cienfuegos, J., García-Ramos, M., Conde-Pipó, J., & Feriche, B. (2015). Effect of different interrepetition rest periods on barbell velocity loss during the ballistic bench press exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(9), 2388-2396.
- García-Ramos, A., Nebot, V., Padial, P., Valverde-Esteve, T., Pablos-Monzó, A., & Feriche, B. (2016). Effects of short inter-repetition rest periods on power output losses during the half squat exercise. *Isokinetics and Exercise Science*, 24(4), 323-330.

- García-Ramos, A., González-Hernández, J. M., Baños-Pelegrín, E., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Boullosa, D., Haff, G. G., & Jiménez-Reyes, P. (2020). Mechanical and metabolic responses to traditional and cluster set configurations in the bench press exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(3), 663-670.
- Gathercole, R. J., Sporer, B. C., Stellingwerff, T., & Sleivert, G. G. (2015). Comparison of the capacity of different jump and sprint field tests to detect neuromuscular fatigue. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(9), 2522-2531.
- Gentil, P., Arruda, A., Souza, D., Giessing, J., Paoli, A., Fisher, J., & Steele, J. (2017). Is There Any Practical Application of Meta-Analytical Results in Strength Training?. *Frontiers in physiology*, 8, 1. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00001>
- Girman, J. C., Jones, M. T., Matthews, T. D., & Wood, R. J. (2014). Acute effects of a cluster-set protocol on hormonal, metabolic and performance measures in resistance-trained males. *European Journal of Sport Science*, 14(2), 151-159.
- Gómez, P.M., Noya, J., Fernández, I., Sillero, M. (Septiembre, 2010). *Validación de la Termografía infrarroja como método de prevención de lesiones en futbolistas profesionales* [Comunicación]. II Congreso Internacional de Ciencias del Deporte de la UCAM, Murcia, España.
- Gómez-Campos, R., Cossio-Bolaños, M. A., Minaya, M. B., & Hochmuller-Fogaca, R. T. (2010). Mecanismos implicados en la fatiga aguda. *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte/International Journal of Medicine and Science of Physical Activity and Sport*, 10(40), 537-555.
- González-Badillo, J. J. (1991). *Halterofilia*. Comité olímpico Español.
- González-Badillo, J. J. (2000). *Concepto y Medida de la Fuerza Explosiva en el Deporte, posibles Aplicaciones al Entrenamiento*. Revista de Entrenamiento Deportivo.
- González-Badillo, J. J., & Gorostiaga-Ayestarán, E. (2002). *Fundamentos del entrenamiento de fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo*. INDE.
- González-Badillo, J. J., & Ribas, J. (2002). *Bases de la programación del entrenamiento de la fuerza*. INDE.
- González-Badillo, J. J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *International Journal of Sports Medicine*, 31(5),
- Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla*

347-352.

- González-Badillo, J. J., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & Pareja-Blanco, F. (2014). Maximal intended velocity training induces greater gains in bench press performance than deliberately slower half-velocity training. *European Journal of Sport Science, 14*(8), 772-781.
- González-Badillo, J. J., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas, J., López-López, C., Mora-Custodio, R., Yañez-García, J. M., & Pareja-Blanco, F. (2016). Short-term recovery following resistance exercise leading or not to failure. *International Journal of Sports Medicine, 37*(4), 295-304.
- González-Badillo, J. J., Sánchez Medina, L., Pareja Blanco, F., & Rodríguez Rosell, D. (2017). *La velocidad de ejecución como referencia para la programación, control y evaluación del entrenamiento de fuerza*. Ergotech Consulting.
- González-Badillo, J. J., Yañez-García, J. M., Mora-Custodio, R., & Rodríguez-Rosell, D. (2017). Velocity loss as a variable for monitoring resistance exercise. *International Journal of Sports Medicine, 38*(3), 217-225.
- González-Badillo, J., & Izquierdo, M. (2008). *Evaluación de la fuerza en el control del entrenamiento y el rendimiento deportivo. Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Médica Panamericana.
- González-Hernández, J. M., García-Ramos, A., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., Márquez, G., Boullosa, D., & Jiménez-Reyes, P. (2020). Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 34*(6), 1581-1590.
- González-Hernández, J. M., García-Ramos, A., Colomer-Poveda, D., Tvarijonavičiute, A., Cerón, J., Jiménez-Reyes, P., & Márquez, G. (2021). Resistance Training to Failure vs. Not to Failure: Acute and Delayed Markers of Mechanical, Neuromuscular, and Biochemical Fatigue. *The Journal of Strength & Conditioning Research, 35*(4), 886-893.
- Gonzalo-Skok, O., Tous-Fajardo, J., Valero-Campo, C., Berzosa, C., Bataller, A. V., Arjol-Serrano, J. L., Moras, G., & Mendez-Villanueva, A. (2017). Eccentric-overload training in team-sport functional performance: constant bilateral vertical versus variable unilateral

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- multidirectional movements. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(7), 951-958.
- Gorostiaga, E. M., 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. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1138-1149.
- Grimby, L., & Hannerz, J. (1977). Firing rate and recruitment order of toe extensor motor units in different modes of voluntary contraction. *The Journal of physiology*, 264(3), 865-879.
- Guillén del Castillo, M., & Linares, G. (2002). *Bases biológicas y fisiológicas del movimiento humano*. Panamericana.
- Haff, G. G., Whitley, A., McCoy, L. B., O'Bryant, H. S., Kilgore, J. L., Haff, E. E., Pierce, K., & Stone, M. H. (2003). Effects of different set configurations on barbell velocity and displacement during a clean pull. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 17(1), 95-103.
- Haff, G. G., Burgess, S., & Stone, M. H. (2008). Cluster training: theoretical and practical applications for the strength and conditioning professional. *Professional Strength & Conditioning*, 12, 12-17.
- Halson, S. L., & Jeukendrup, A. E. (2004). Does overtraining exist?. *Sports Medicine*, 34(14), 967-981.
- Hamdi, M. M., & Mutungi, G. (2010). Dihydrotestosterone (DHT) increases the uptake of isoleucine in mouse fast-twitch fibre bundles through an epidermal growth factor receptor (EGFR)-dependent mechanism. *Proceedings of the Physiological Society*, 19, PC71.
- Hansen, K. T., Cronin, J. B., & Newton, M. J. (2011). The effect of cluster loading on force, velocity, and power during ballistic jump squat training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(4), 455-468.
- Hardee, J. P., Triplett, N. T., Utter, A. C., Zwetsloot, K. A., & McBride, J. M. (2012). Effect of interrepetition rest on power output in the power clean. *The Journal of Strength &*

- Conditioning Research*, 26(4), 883-889.
- Hargreaves, M. (2005). Metabolic factors in fatigue. *Sports Science*, 18(3), 98.
- Hauswirth, C., & Mujika, I. (2013). *Recovery for Performance in Sport*. INSEP.
- Herrero, J. A., Izquierdo, M., Maffiuletti, N. A., & García-López, J. (2006). Electromyostimulation and plyometric training effects on jumping and sprint time. *International Journal of Sports Medicine*, 27(7), 533-539.
- Heyward, V. (2008). *Evaluación de la aptitud física y prescripción del ejercicio*. Médica Panamericana.
- Hildebrandt, C., Raschner, C., & Ammer, K. (2010). An overview of recent application of medical infrared thermography in sports medicine in Austria. *Sensors*, 10(5), 4700-4715.
- Hollander, D. B., Kraemer, R. R., Kilpatrick, M. W., Ramadan, Z. G., Reeves, G. V., Francois, M., Herbert, E. P., & Tryniecki, J. L. (2007). Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(1), 37-40.
- Hooper, D. R., Szivak, T. K., Comstock, B. A., Dunn-Lewis, C., Apicella, J. M., Kelly, N. A., Creighton, B. C., Flanagan, S. D., Looney, D. P., Volek, J. S., Maresh, C. M., & Kraemer, W. J. (2014). Effects of fatigue from resistance training on barbell back squat biomechanics. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(4), 1127-1134.
- Horswill, C. A. (1998). Effective fluid replacement. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 8(2), 175-295.
- Hortobágyi, T. (2003). The positives of negatives: clinical implications of eccentric resistance exercise in old adults. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 58(5), M417-M418.
- Horwath, O., Paulsen, G., Esping, T., Seynnes, O., & Olsson, M. C. (2019). Isokinetic resistance training combined with eccentric overload improves athletic performance and induces muscle hypertrophy in young ice hockey players. *Journal of Science and Medicine in sport*, 22(7), 821-826.
- Hultman, E., & Sjöholm, H. (1983). Electromyogram, force and relaxation time during and after continuous electrical stimulation of human skeletal muscle in situ. *The Journal of*

- Physiology*, 339(1), 33-40.
- Hunter, S. K., Critchlow, A., & Enoka, R. M. (2005). Muscle endurance is greater for old men compared with strength-matched young men. *Journal of Applied Physiology*, 99(3), 890-897.
- Hunter, S. K., Butler, J. E., Todd, G., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2006). Supraspinal fatigue does not explain the sex difference in muscle fatigue of maximal contractions. *Journal of Applied Physiology*, 101(4), 1036-1044.
- Hwang, U. J., Jung, S. H., Kim, H. A., Kim, J. H., & Kwon, O. Y. (2020). Effect of Abdominal Electrical Muscle Stimulation Training With and Without Superimposed Voluntary Muscular Contraction on Lumbopelvic Control. *Journal of Sport Rehabilitation*, 29(8), 1137-1144.
- Iacono, A. D., Beato, M., & Halperin, I. (2019). The effects of cluster-set and traditional-set postactivation potentiation protocols on vertical jump performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(4), 464-469.
- Iacono, A. D., Martone, D., & Hayes, L. (2020). Acute mechanical, physiological and perceptual responses in older men to traditional-set or different cluster-set configuration resistance training protocols. *European Journal of Applied Physiology*, 120(10), 2311-2323.
- Iglesias-Soler, E., Carballeira, E., Sanchez-Otero, T., Mayo, X., Jimenez, A., & Chapman, M. L. (2012). Acute effects of distribution of rest between repetitions. *International journal of sports medicine*, 33(5), 351-358.
- Iglesias-Soler, E., Carballeira, E., Sánchez-Otero, T., Mayo, X., & Fernández-del-Olmo, M. (2014). Performance of maximum number of repetitions with cluster-set configuration. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(4), 637-642.
- Illera-Domínguez, V., Nuell, S., Carmona, G., Padullés, J. M., Padullés, X., Lloret, M., Cussó, R., Alomar, X., & Cadefau, J. A. (2018). Early functional and morphological muscle adaptations during short-term inertial-squat training. *Frontiers in Physiology*, 9, 1265.
- Isidori, E. (2015). *Consideraciones De La Fuerza a Nivel Respiratorio*.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Izquierdo, M., Ibañez, J., HÄKKINEN, K., Kraemer, W. J., Larión, J. L., & Gorostiaga, E. M. (2004). Once weekly combined resistance and cardiovascular training in healthy older men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(3), 435-443.
- Jimenez-Reyes, P., Pareja-Blanco, F., Cuadrado-Peñafiel, V., Morcillo, J. A., Párraga, J. A., & González-Badillo, J. J. (2016). Mechanical, metabolic and perceptual response during sprint training. *International Journal of Sports Medicine*, 37(10), 807-812.
- Johnson, B. L., Adamczyk, J. W., Tennoe, K. O., & Stromme, S. B. (1976). A comparison of concentric and eccentric muscle training. *Medicine and Science in Sports*, 8(1), 35-38.
- Joy, J. M., Oliver, J. M., McCleary, S. A., Lowery, R. P., Wilson, J. M. (2013). Power output and electromyography activity of the back squat exercise with cluster sets. *Journal of Sport Sciences*. 1, 37-45.
- Jukic, I., & Tufano, J. J. (2019). Shorter but more frequent rest periods: no effect on velocity and power compared to traditional sets not performed to failure. *Journal of human kinetics*, 66, 257-268.
- Jukic, I., Ramos, A. G., Helms, E. R., McGuigan, M. R., & Tufano, J. J. (2020). Acute effects of cluster and rest redistribution set structures on mechanical, metabolic, and perceptual fatigue during and after resistance training: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(12), 2209-2236.
- Keyl, W., & Lenhart, P. (1975). Thermography in sport injuries and lesions of the locomotor system due to sport. *Fortschritte der Medizin*, 93(3), 124-126.
- Kistemaker, J. A., Den Hartog, E. A., & Daanen, H. A. M. (2006). Reliability of an infrared forehead skin thermometer for core temperature measurements. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 30(4), 252-261.
- Knuttgen, H. G., & Komi, P. V. (2003). *Basic Considerations for Exercise*. Blackwell Science.
- Koefoed, N., Lerche, M., Jensen, B. K., Kjær, P. I. A., Dam, S., Horslev, R., & Hansen, E. A. (2018). Peak power output in loaded jump squat exercise is affected by set structure. *International Journal of Exercise Science*, 11(1), 776-784.
- Koizumi, K., Fujita, Y., Muramatsu, S., Manabe, M., Ito, M., & Nomura, J. (2011). Active recovery effects on local oxygenation level during intensive cycling bouts. *Journal of sports sciences*, 29(9), 919-926.

- Kots, J. M., & Chwilon, W. (1974). Das muskelkrafttraining mit der method der elektromyostimulation (russ.). In G.G. Adrianowa, J.M. Koz, W.A. Martjanow, W.A. Chwilon (Coord.). *Die Anwendung der Elektrostimulation für das Training der Muskelkraft*.
- Kowalchuk, K., & Butcher, S. (2019). Eccentric Overload Flywheel Training in Older Adults. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 4(3), 61.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine & science in sports & exercise*, 36(4), 674-688.
- Krcmár, M., Krcmárová, B., Bakalár, I., & Šimonek, J. (2021). Acute Performance Enhancement Following Squats Combined With Elastic Bands on Short Sprint and Vertical Jump Height in Female Athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(2), 318-324.
- Krustrup, P., Mohr, M., Steensberg, A., Bencke, J., Kjær, M., & Bangsbo, J. (2006). Muscle and blood metabolites during a soccer game: implications for sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(6), 1165-1174.
- Lacaba, R., & Jiménez, A. (2001). *Manual del entrenador personal. Marketing y nuevas tecnologías*. Gymnos.
- Lage, V. K., Lacerda, A. C. R., Neves, C. D., Chaves, M. G. A., Soares, A. A., Lima, L. P., ... & Mendonça, V. A. (2019). Cardiorespiratory responses in different types of squats and frequencies of whole body vibration in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Journal of Applied Physiology*, 126(1), 23-29.
- Lake, D. A. (1992). Neuromuscular electrical stimulation. *Sports Medicine*, 13(5), 320-336.
- Lander, J. (1985). Maximums based on reps. *National Strength and Conditioning Association Journal*, 6, 60-61.
- Lanzani, A. (2000). *Allenamento Elettrostimolazione*. Professione Fitness.
- Lastayo, P. C., Reich, T. E., Urquhart, M., Hoppeler, H., & Lindstedt, S. L. (1999). Chronic

- eccentric exercise: improvements in muscle strength can occur with little demand for oxygen. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 276(2), R611-R615.
- Latella, C., Teo, W. P., Drinkwater, E. J., Kendall, K., & Haff, G. G. (2019). The acute neuromuscular responses to cluster set resistance training: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 49(12), 1861-1877.
- Lawton, T. W., Cronin, J. B., Drinkwater, E., Lindsell, R. P., & Pyne, D. (2004). The effect of continuous repetition training and intra-set rest training on bench press strength and power. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 44(4), 361-367.
- Lawton, T. W., Cronin, J. B., & Lindsell, R. P. (2006). Effect of interrepetition rest intervals on weight training repetition power output. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(1), 172-176.
- Lea, J. W., O'Driscoll, J. M., Coleman, D. A., & Wiles, J. D. (2021). Validity and reliability of RPE as a measure of intensity during isometric wall squat exercise. *Journal of Clinical and Translational Research*, 7(2), 248.
- Legido, J.C. (1986). *Fatiga y entrenamiento. III Jornadas Nacionales de Medicina en Atletismo*. ANAMEDE.
- Lombardi, V. (1989). *Beginning weight training*. WC Brown of Dubuque.
- López, J.A, Dorado, C. (2006). *Fatiga, dolor muscular tardío y sobreentrenamiento*. A: López J, Fernández A. *Fisiología del ejercicio*. Madrid: Medica Panamericana; 2006.
- López-Calbet, J. A., & Dorado García, C. (2006). *Fatiga, dolor muscular tardío y sobreentrenamiento*. En J. López-Chicharro, & A. Fernández-Vaquero (Coord.). *Fisiología del ejercicio (pp. 755-810)*. Editorial Médica Panamericana.
- López-Calbet, J. A. (1998): *Entrenamiento pliométrico y mejora de la capacidad de salto*. *Archivos de Medicina del Deporte*, 15, 81-82.
- López-Chicharro, J, Fernández-Vaquero, A. (2006). *Fisiología del ejercicio*. Médica Panamericana.
- Lundberg, T. R., García-Gutiérrez, M. T., Mandić, M., Lilja, M., & Fernandez-Gonzalo, R. (2019). Regional and muscle-specific adaptations in knee extensor hypertrophy using

- flywheel versus conventional weight-stack resistance exercise. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 44(8), 827-833.
- MacIntosh, B. R., Holash, R. J., & Renaud, J. M. (2012). Skeletal muscle fatigue—regulation of excitation–contraction coupling to avoid metabolic catastrophe. *Journal of Cell Science*, 125(9), 2105-2114.
- Maffiuletti, N. A., Pensini, M., & Martin, A. (2002). Activation of human plantar flexor muscles increases after electromyostimulation training. *Journal of Applied Physiology*, 92(4), 1383-1392.
- Maffiuletti, N. A., Bramante, J., Jubeau, M., Bizzini, M., Deley, G., & Cometi, G. (2009). Feasibility and efficacy on progressive electrostimulation strength training for competitive tennis players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23 (2), 677-682.
- Magyari, P. (2010). Resistance training intensity. *ACSMs Certif News*, 20(2), 3-4.
- Malatesta, D., Cattaneo, F., Dugnani, S., & Maffiuletti, N. (2003). Effects of electromyostimulation training and volleyball practice on jumping ability. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 17(3), 573-579.
- Malisoux, L., Francaux, M., Nielens, H., & Theisen, D. (2006). Stretch-shortening cycle exercises: an effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers. *Journal of applied physiology*, 100(3), 771-779.
- Mangine, R. E., Siqueland, K. A., & Noyes, F. R. (1987). The use of thermography for the diagnosis and management of patellar tendinitis. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 9(4), 132-140.
- Marins, J. C. B., Fernandes, A. A., Cano, S. P., Moreira, D. G., da Silva, F. S., Costa, C. M. A., ... & Sillero-Quintana, M. (2014). Thermal body patterns for healthy Brazilian adults (male and female). *Journal of thermal biology*, 42, 1-8.
- Maroto-Izquierdo, S., García-López, D., & de Paz, J. A. (2017). Functional and muscle-size effects of flywheel resistance training with eccentric-overload in professional handball players. *Journal of Human Kinetics*, 60, 133-143.

- Maroto-Izquierdo, S., García-López, D., Fernández-Gonzalo, R., Moreira, O. C., González-Gallego, J., & de Paz, J. A. (2017). Skeletal muscle functional and structural adaptations after eccentric overload flywheel resistance training: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(10), 943-951.
- Marques, M. C., Izquierdo, M., & Pereira, A. (2013). High-speed resistance training in elderly people: a new approach toward counteracting age-related functional capacity loss. *Strength & Conditioning Journal*, 35(2), 23-29.
- Marshall, P. W., Robbins, D. A., Wrightson, A. W., & Siegler, J. C. (2012). Acute neuromuscular and fatigue responses to the rest-pause method. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(2), 153-158.
- Martínez-López, E. J., Benito-Martínez, E., Hita-Contreras, F., Lara-Sánchez, A., & Martínez-Amat, A. (2012). Effects of electrostimulation and plyometric training program combination on jump height in teenage athletes. *Journal of Sports Science & Medicine*, 11(4), 727-735.
- Marx, R. (1933). Muscular Fatigue, Muscle Strain and Muscle Cramps. *California and Western Medicine*, 38(2), 96-97.
- Maté-Muñoz JL, Lougedo JH, Barba M, García-Fernández P, Garnacho-Castaño MV, Domínguez R (2017). Muscular fatigue in response to different modalities of CrossFit sessions. *PLoS ONE* 12(7), e0181855.
- Maya, J., & Albornoz, M. (2010). Estimulación eléctrica transcutánea y neuromuscular. Barcelona: Elsevier.
- Mayhew, J., Ball, T.E., Arnold, M.D., & Bowen, J.C. (1992). Relative Muscular Endurance Performance as a Predictor of Bench Press Strength in College Men and Women. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 6, 200–206.
- Mayo, X., Iglesias-Soler, E., & Fernández-Del-Olmo, M. (2014). Effects of set configuration of resistance exercise on perceived exertion. *Perceptual and Motor Skills*, 119(3), 825-837.
- Mazzetti, S., Douglass, M., Yocum, A., & Harber, M. (2007). Effect of explosive versus slow contractions and exercise intensity on energy expenditure. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(8), 1291-1301.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- McDonell, G. H. (1979). Direct stimulation of the adductor pollicis in man. *Journal of Physiology*, 300, 2-3.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., Raglin, J., Rietjens, G., Steinacker, J., & Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis and treatment of the overtraining syndrome: Joint consensus statement of the European College of Sport Science (ECSS) and the American College of Sports Medicine (ACSM). *European Journal of Sport Science*, 13(1), 1-24.
- Meylan, C., Cronin, J., & Nosaka, K. (2008). Isoinertial assessment of eccentric muscular strength. *Strength & Conditioning Journal*, 30(2), 56-64.
- Micke, F., Kleinöder, H., Dörmann, U., Wirtz, N., & Donath, L. (2018). Effects of an eight-week superimposed submaximal dynamic whole-body electromyostimulation training on strength and power parameters of the leg muscles: a randomized controlled intervention study. *Frontiers in Physiology*, 9, 1719.
- Milner-Brown, H. S., Stein, R. B., & Yemm, R. (1973). The orderly recruitment of human motor units during voluntary isometric contractions. *The Journal of Physiology*, 230(2), 359-370.
- Minett, G. M., & Duffield, R. (2014). Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise. *Frontiers in Physiology*, 3, 5-24.
- Miras-Moreno S. (2020). La altura del salto en contramovimiento como instrumento de control de la fatiga neuromuscular. Revisión sistemática. *RETOS. Nuevas tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*. 37.
- Mirella, R. (2009). *Las nuevas metodologías del entrenamiento de la fuerza, la resistencia, la velocidad y la flexibilidad*. Editorial Paidotribo.
- Mjølsnes, R., Arnason, A., Østhagen, T., Raastad, T., & Bahr, R. (2004). A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 14(5), 311-317.
- Mohr, M., Krustup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: a brief review. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 593-599.
- Mohr, M., Mujika, I., Santisteban, J., Randers, M. B., Bischoff, R., Solano, R., Hewitt, A.,

- Zubillaga, A., Peltola, E., & Krstrup, P. (2010). Examination of fatigue development in elite soccer in a hot environment: a multi-experimental approach. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, *20*, 125-132.
- Moir, G. L., Graham, B. W., Davis, S. E., Guers, J. J., & Witmer, C. A. (2013). Effect of cluster set configurations on mechanical variables during the deadlift exercise. *Journal of Human Kinetics*, *39*, 15-23.
- Monteiro, C. R., Guerra, I., & Barros, T. L. D. (2003). Hydration in soccer: a review. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, *9*, 243-246.
- Monteiro, E. R., Novaes, J. S., Fiuza, A. G., Portugal, E., Triani, F. S., Bigio, L., ... & Neto, V. G. C. (2018). Behavior of heart rate variability after 10 repetitions maximum load test for lower limbs. *International Journal of Exercise Science*, *11*(6), 834-843.
- Mora-Custodio, R., Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Sánchez-Moreno, M., Pareja-Blanco, F., & González-Badillo, J. J. (2018). Effect of different inter-repetition rest intervals across four load intensities on velocity loss and blood lactate concentration during full squat exercise. *Journal of Sports Sciences*, *36*(24), 2856-2864.
- Morales-Artacho, A. J., Padial, P., García-Ramos, A., Pérez-Castilla, A., & Feriche, B. (2018). Influence of a cluster set configuration on the adaptations to short-term power training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *32*(4), 930-937.
- Morán-Navarro, R., Pérez, C. E., Mora-Rodríguez, R., de la Cruz-Sánchez, E., González-Badillo, J. J., Sanchez-Medina, L., & Pallarés, J. G. (2017). Time course of recovery following resistance training leading or not to failure. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(12), 2387-2399.
- Morgan, D. L., & Allen, D. G. (1999). Early events in stretch-induced muscle damage. *Journal of Applied Physiology*, *87*(6), 2007-2015.
- Morishita, S., Tsubaki, A., Nakamura, M., Nashimoto, S., Fu, J. B., & Onishi, H. (2019). Rating of perceived exertion on resistance training in elderly subjects. *Expert Review of Cardiovascular Therapy*, *17*(2), 135-142.
- Morrison, S., Sleivert, G. G., & Cheung, S. S. (2004). Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *European Journal of Applied Physiology*, *91*(5), 729-736.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Morton, R. H., Fitz-Clarke, J. R., & Banister, E. W. (1990). Modeling human performance in running. *Journal of Applied Physiology*, *69*(3), 1171-1177.
- Murphy, A. J., & Wilson, G. J. (1997). The ability of tests of muscular function to reflect training-induced changes in performance. *Journal of Sports Sciences*, *15*(2), 191-200.
- Naclerio, F. J., Figueroa, A. J. (Enero, 2004). *Determinación de Los niveles de fuerza máxima aplicada, velocidad y potencia por medio de un test creciente en pres de banca plano, en levantadores españoles* (Comunicación). III congreso de la Asociación Española de Ciencias del Deporte. Valencia, España.
- Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2012). Recovery in soccer. *Sports Medicine*, *42*(12), 997-1015.
- Neyroud, D., Samararatne, J., Kayser, B., & Place, N. (2017). Neuromuscular fatigue after repeated jumping with concomitant electrical stimulation. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(10), 1335-1340.
- Nicholson, G., Ispoglou, T., & Bissas, A. (2016). The impact of repetition mechanics on the adaptations resulting from strength-, hypertrophy-and cluster-type resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, *116*(10), 1875-1888.
- Nickerson, B. S., Mangine, G. T., Williams, T. D., & Martinez, I. A. (2018). Effect of cluster set warm-up configurations on sprint performance in collegiate male soccer players. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, *43*(6), 625-630.
- Nickerson, B. S., Williams, T. D., Snarr, R. L., & Park, K. S. (2019). Individual and combined effect of inter-repetition rest and elastic bands on jumping potentiation in resistance-trained men. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *33*(8), 2087-2093.
- Nielsen, B. (1984). The effect of dehydration on circulation and temperature regulation during exercise. *Journal of Thermal Biology*, *9*, 107-112.
- Nóbrega, S. R., & Libardi, C. A. (2016). Is resistance training to muscular failure necessary?. *Frontiers in physiology*, *7*, 10.
- Núñez, F. J., Suarez-Arrones, L. J., Cater, P., & Méndez-Villanueva, A. (2017). The high-pull exercise: A comparison between a versapulley flywheel device and the free weight. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(4), 527-532.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Núñez, F. J., Santalla, A., Carrasquilla, I., Asian, J. A., Reina, J. I., & Suarez-Arrones, L. J. (2018). The effects of unilateral and bilateral eccentric overload training on hypertrophy, muscle power and COD performance, and its determinants, in team sport players. *PLoS one*, *13*(3), e0193841.
- O'Connor, B., Simmons, J., & O'Shea, P. (1989). *Weight Training Today*. West Publishing.
- Oliver, J. M., Jagim, A. R., Sanchez, A. C., Mardock, M. A., Kelly, K. A., Meredith, H. J., Smith, G. L., Greenwood, M., Riechman, S. E., Fluckey, J. D., Crouse, S. F. & Kreider, R. B. (2013). Greater gains in strength and power with intraset rest intervals in hypertrophic training. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *27*(11), 3116-3131.
- Oliver, J. M., Kreutzer, A., Jenke, S., Phillips, M. D., Mitchell, J. B., & Jones, M. T. (2015). Acute response to cluster sets in trained and untrained men. *European Journal of Applied Physiology*, *115*(11), 2383-2393.
- Oliver, J. M., Jenke, S. C., Mata, J. D., Kreutzer, A., & Jones, M. T. (2016a). Acute effect of cluster and traditional set configurations on myokines associated with hypertrophy. *International Journal of Sports Medicine*, *37*(13), 1019-1024.
- Oliver, J. M., Kreutzer, A., Jenke, S. C., Phillips, M. D., Mitchell, J. B., & Jones, M. T. (2016b). Velocity drives greater power observed during back squat using cluster sets. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *30*(1), 235-243.
- Onambélé, G. L., Maganaris, C. N., Mian, O. S., Tam, E., Rejc, E., McEwan, I. M., & Narici, M. V. (2008). Neuromuscular and balance responses to flywheel inertial versus weight training in older persons. *Journal of Biomechanics*, *41*(15), 3133-3138.
- Overbeek, G. A. (1949). Adrenals and fatigue; the cholinesterase activity of serum, brain and muscle in normal and adrenalectomized rats. *Archives Internationales de Pharmacodynamie et de Therapie*, *79*(2-3), 314-322.
- Owerekowicz, T., Cotter, J. A., Haddad, F., Yu, A. M., Camilon, M. L., Hoang, T. N., Jimenez, D. J., Kreitenberg, A., Tesch, P. A., Caiozzo, V. J., & Adams GR. (2016). Exercise responses to gravity-independent flywheel aerobic and resistance training. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *87*(2), 93-101.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Paillard, T. (2008). Combined application of neuromuscular electrical stimulation and voluntary muscular contractions. *Sports Medicine*, 38(2), 161-177.
- Paillard, T., Maitre, J., Chaubet, V., & Borel, L. (2010). Stimulated and voluntary fatiguing contractions of quadriceps femoris differently disturb postural control. *Neuroscience Letters*, 477(1), 48-51.
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & González-Badillo, J. J. (2014). Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance. *International Journal of Sports Medicine*, 35(11), 916-924.
- Pareja-Blanco, F., Villalba-Fernández, A., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., & González-Badillo, J. J. (2019). Time course of recovery following resistance exercise with different loading magnitudes and velocity loss in the set. *Sports*, 7(3), 59.
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Aagaard, P., Sánchez-Medina, L., Ribas-Serna, J., Mora-Custodio, R., Otero-Esquina, C., Yañez-García, J. M., & González-Badillo, J. J. (2020). Time course of recovery from resistance exercise with different set configurations. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(10), 2867-2876.
- Párraga-Montilla, J. A., García-Ramos, A., Castaño-Zambudio, A., Capelo-Ramírez, F., González-Hernández, J. M., Cordero-Rodríguez, Y., & Jiménez-Reyes, P. (2020). Acute and delayed effects of a resistance training session leading to muscular failure on mechanical, metabolic, and perceptual responses. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 34(8), 2220-2226.
- Paulsen, G., Cramer, R., Benestad, H. B., Fjeld, J. G., Morkrid, L., Hallén, J., & Raastad, T. (2010). Time course of leukocyte accumulation in human muscle after eccentric exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(1), 75-85.
- Pedersen, H., Saeterbakken, A. H., Vagle, M., Fimland, M. S., & Andersen, V. (2020). Electromyographic Comparison of Flywheel Inertial Leg Curl and Nordic Hamstring Exercise Among Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 16(1), 97-102.
- Pesta, D. H., Goncalves, R. L., Madiraju, A. K., Strasser, B., & Sparks, L. M. (2017). Resistance training to improve type 2 diabetes: working toward a prescription for the

- future. *Nutrition & Metabolism*, 14(1), 1-10.
- Peters, R. A. (1913). The heat production of fatigue and its relation to the production of lactic acid in amphibian muscle. *The Journal of physiology*, 47(3), 243-271.
- Petibois, C., Cazorla, G., Poortmans, J. R., & Déléris, G. (2003). Biochemical aspects of overtraining in endurance sports. *Sports Medicine*, 33(2), 83-94.
- Petré, H., Wernstål, F., & Mattsson, C. M. (2018). Effects of flywheel training on strength-related variables: A meta-analysis. *Sports Medicine-Open*, 4(1), 1-15.
- Piqueras-Sanchiz, F., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., Bachero-Mena, B., Sánchez-Moreno, M., Martín-Rodríguez, S., García-García, Ó., & Pareja-Blanco, F. (2021). Acute Mechanical, Neuromuscular, and Metabolic Responses to Different Set Configurations in Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004068>.
- Plisk, S. S., & Stone, M. H. (2003). Periodization strategies. *Strength Conditional Journal*, 25, 19-37.
- Plowman, S. A., & Smith, D. L. (2013). *Exercise Physiology for Health Fitness and Performance*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Pombo-Fernández, M., Rodríguez-Barnada, J., Brunet-Pàmies, X., & Requena-Sánchez, B. (2004). La electroestimulación, entrenamiento y periodización. *Aplicación práctica al fútbol y 45 deportes*, (2), 11-14. Ed. Paidotrabó.
- Poortmans, J. R., Boisseau, N., Moraine, J. J., Moreno-Reyes, R., & Goldman, S. (2005). Estimation of total-body skeletal muscle mass in children and adolescents. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(2), 316-22.
- Póvoas, S. C., Ascensão, A. A., Magalhães, J., Seabra, A. F., Krstrup, P., Soares, J. M., & Rebelo, A. N. (2014). Analysis of Fatigue Development During Elite Male Handball Matches. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(9), 2640-2648.
- Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of physiology*, 537(2), 333-345.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Raastad, T., & Hallén, J. (2000). Recovery of skeletal muscle contractility after high-and moderate-intensity strength exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 82(3), 206-214.
- Raeder, C., Wiewelhove, T., Westphal-Martinez, M. P., Fernandez-Fernandez, J., de Paula Simola, R. A., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Ferrauti, A. (2016). Neuromuscular fatigue and physiological responses after five dynamic squat exercise protocols. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(4), 953-965.
- Rampinini, E., Bosio, A., Ferraresi, I., Petruolo, A., Morelli, A., & Sassi, A. (2011). Match-related fatigue in soccer players. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(11), 2161-2170.
- Ratamess N. (2012). *ACSM's foundations of strength training and conditioning*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Ratamess, N., Alvar, B., Evetoch, T. K., Housh, T. J., Kibler, W. B., & Kraemer, W. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults [ACSM position stand]. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41, 687-708.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., Longo, S., & Narici, M. V. (2009). Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Experimental Physiology*, 94(7), 825-833.
- Ribeiro, A. S., Avelar, A., Schoenfeld, B. J., Fleck, S. J., Souza, M. F., Padilha, C. S., & Cyrino, E. S. (2015). Analysis of the training load during a hypertrophy-type resistance training programme in men and women. *European Journal of Sport Science*, 15(4), 256-264.
- Richardson, D. L., & Clarke, N. D. (2016). Effect of coffee and caffeine ingestion on resistance exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(10), 2892-2900.
- Río-Rodríguez, D., Iglesias-Soler, E., & Fernández del Olmo, M. (2016). Set configuration in resistance exercise: muscle fatigue and cardiovascular effects. *PLoS One*, 11(3), e0151163.
- Roberts, D., & Smith, D. J. (1989). Biochemical aspects of peripheral muscle fatigue. *Sports Medicine*, 7(2), 125-138.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Robertson, R. J., Goss, F. L., Rutkowski, J., Lenz, B., Dixon, C., Timmer, J., Frazee, K., & Andreacci, J. (2003). Concurrent validation of the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(2), 333-341.
- Robertson, R. J. (2004). The OMNI Picture System of Perceived Exertion. In M. S. Bahrke (editor), *Perceived Exertion for Practitioners: Rating Effort with the OMNI Picture System*. Human Kinetics.
- Rodas, G., Pedret Carballido, C., Ramos, J., & Capdevila, L. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardiaca: Concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (II). *Archivos de Medicina del Deporte*, 119-127.
- Romero-Rodriguez, D., Gual, G., & Tesch, P. A. (2011). Efficacy of an inertial resistance training paradigm in the treatment of patellar tendinopathy in athletes: a case-series study. *Physical Therapy in Sport*, 12(1), 43-48.
- Ruiz, P., González., & Mora, J. (2007). La electroestimulación como complemento al entrenamiento isométrico voluntario en la mejora de la fuerza isométrica máxima. Diferencias entre hombres y mujeres de mediana edad. *Apunts*, 89 (3), 56-63.
- Sabido, R., Hernández-Davó, J. L., & Pereyra-Gerber, G. T. (2018). Influence of different inertial loads on basic training variables during the flywheel squat exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(4), 482-489.
- Sabido, R., Hernández-Davó, J. L., Capdepon, L., & Tous-Fajardo, J. (2020). How Are Mechanical, Physiological, and Perceptual Variables Affected by the Rest Interval Between Sets During a Flywheel Resistance Session?. *Frontiers in Physiology*, 11, 663.
- Sampedro, J., Piñonosa, S., & Fernandez, I. (2012). La termografía como nueva herramienta de evaluación en baloncesto. Estudio piloto realizado a un jugador profesional de la ACB. *Cuadernos de psicología del deporte*, 12(1), 51-6.
- Sánchez, B. R., Puche, P. P., & González-Badillo, J. J. (2005). Percutaneous electrical stimulation in strength training: an update. *Journal Strength and Conditioning Research*, 19(2), 438-448.
- Sanchez-Medina, L., & González-Badillo, J. J. (2011). Velocity loss as an indicator of

- neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(9), 1725-1734.
- Sánchez-Medina, L., Pallarés, J. G., Pérez, C. E., Morán-Navarro, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Estimation of relative load from bar velocity in the full back squat exercise. *Sports Medicine International Open*, 1(2), E80-E88.
- Santagnello, S. B., Martins, F. M., de Oliveira Junior, G. N., de Sousa, J. D. F. R., Nomelini, R. S., Murta, E. F. C., & Orsatti, F. L. (2020). Improvements in muscle strength, power, and size and self-reported fatigue as mediators of the effect of resistance exercise on physical performance breast cancer survivor women: a randomized controlled trial. *Supportive Care in Cancer*, 28(12), 6075-6084.
- Sañudo, B., Bartolomé, D., Tejero, S., Ponce-González, J. G., Loza, J. P., & Figueroa, A. (2020). Impact of active recovery and whole-body electromyostimulation on blood-flow and blood lactate removal in healthy people. *Frontiers in Physiology*, 11, 310.
- Schilling, B. K., Falvo, M. J., & Chiu, L. Z. (2008). Force-velocity, impulse-momentum relationships: Implications for efficacy of purposefully slow resistance training. *Journal of Sports Science & Medicine*, 7(2), 299-304.
- Schoenfeld, B. J. (2013). Is there a minimum intensity threshold for resistance training-induced hypertrophic adaptations? *Sports Medicine*, 43(12), 1279-1288.
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2016). Effects of resistance training frequency on measures of muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46(11), 1689-1697.
- Schoenfeld, B. J., & Grgic, J. (2018). Evidence-based guidelines for resistance training volume to maximize muscle hypertrophy. *Strength & Conditioning Journal*, 40(4), 107-112.
- Schuhbeck, E., Birkenmaier, C., Schulte-Göcking, H., Pronnet, A., Jansson, V., & Wegener, B. (2019). The influence of WB-EMS-training on the performance of ice hockey players of different competitive status. *Frontiers in Physiology*, 10, 1136.
- Scott, T. J., Black, C. R., Quinn, J., & Coutts, A. J. (2013). Validity and reliability of the session-RPE method for quantifying training in Australian football: a comparison of the CR10

- and CR100 scales. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(1), 270-276.
- Seirul-lo, F. (1998). *Planificación a largo plazo en los deportes colectivos. Curso sobre entrenamiento deportivo en la infancia y la adolescencia. Escuela Canaria del Deporte. Dirección General de Deportes del Gobierno de Canarias.*
- Selye, H. (1950). Stress and the general adaptation syndrome. *British medical Journal*, 1(4667), 1383.
- Siff, M.C. y Verkhoshansky, Y. (2000). *Superentrenamiento*. Paidotribo.
- Smorawinski, J., Młynarczyk, C., Ziemia, A. W., Mikulski, T., Cybulski, G., Grucza, R., ... & Greenleaf, J. E. (2005). Exercise training and 3-day head down bed rest deconditioning: exercise thermoregulation. *Journal of physiology and pharmacology: an official journal of the Polish Physiological Society*, 56(1), 101-110.
- Spiering, B. A., Kraemer, W. J., Anderson, J. M., Armstrong, L. E., Nindl, B. C., Volek, J. S., & Maresh, C. M. (2008). Resistance exercise biology. *Sports Medicine*, 38(7), 527-540.
- Stanley, J., Peake, J. M., & Buchheit, M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription. *Sports medicine*, 43(12), 1259-1277.
- Stone, M. H., Pierce, K., Godsen, R., Wilson, G. D., Blessing, D., Rozenek, R., & Chromiak, J. (1987). Heart rate and lactate levels during weight-training exercise in trained and untrained men. *The Physician and Sportsmedicine*, 15(5), 97-105.
- Suarez-Arrones, L., Saez de Villarreal, E., Núñez, F. J., Di Salvo, V., Petri, C., Buccolini, A., Maldonado, R. A., Torreno, N., & Mendez-Villanueva, A. (2018). In-season eccentric-overload training in elite soccer players: Effects on body composition, strength and sprint performance. *PloS one*, 13(10), e0205332. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205332>.
- Taylor, J. L., Todd, G., & Gandevia, S. C. (2006). Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 33(4), 400-405.
- Tesch, P. A., Pozzo, M., Ainegren, M., Swarén, M., & Linnehan, R. M. (2013). Cardiovascular responses to rowing on a novel ergometer designed for both resistance and aerobic training in space. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 84(5), 516-521.
- Thomas, M. M., Cheung, S. S., Elder, G. C., & Sleivert, G. G. (2006). Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. *Journal*

- of Applied Physiology*, 100(4), 1361-1369.
- Thomasson, M. L., & Comfort, P. (2012). Occurrence of fatigue during sets of static squat jumps performed at a variety of loads. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(3), 677-683.
- Thorpe, R. T., Strudwick, A. J., Buchheit, M., Atkinson, G., Drust, B., & Gregson, W. (2017). The influence of changes in acute training load on daily sensitivity of morning-measured fatigue variables in elite soccer players. *International Journal of Sports Physiology and performance*, 12(s2), 2107-2113.
- Thorsen, R., Spadone, R., & Ferrarin, M. (2001). A pilot study of myoelectrically controlled FES of upper extremity. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 9(2), 161-168.
- Timón, R., Ponce-González, J. G., González-Montesinos, J. L., Olcina, G., Pérez-Pérez, A., & Castro-Piñero, J. (2017). Inertial flywheel resistance training and muscle oxygen saturation. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58(11), 1618-1624.
- Todd, J. S., Shurley, J. P., & Todd, T. C. (2012). Thomas L. DeLorme and the science of progressive resistance exercise. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(11), 2913-2923.
- Tøien, T., Pedersen Haglo, H., Unhjem, R., Hoff, J., & Wang, E. (2018). Maximal strength training: the impact of eccentric overload. *Journal of Neurophysiology*, 120(6), 2868-2876.
- Torrejón, A., Janicijevic, D., Haff, G. G., & García-Ramos, A. (2019). Acute effects of different set configurations during a strength-oriented resistance training session on barbell velocity and the force-velocity relationship in resistance-trained males and females. *European Journal of Applied Physiology*, 119(6), 1409-1417.
- Torres-López de Haro, F., Olcina, G., Timón, R. (2019). Postperformance fatigue in cluster-set training with free and guided weight in trained athletes. *Medicine Dello Sport*, 72(4), 642-53.
- Torres-López De Haro, F., Olcina-Camacho, G., & Timón-Andrada, R. (2021). Fatigue and physical performance after a squat inertial flywheel training. *Medicine dello Sport*, 74(2),

- 235-244.
- Tous, J. (2010). Entrenamiento de la fuerza mediante sobrecargas excéntricas. En D. Romero y J. Tous. *Prevención de lesiones en el deporte: claves para un rendimiento deportivo óptimo* (pp. 217-239). Médica Panamericana.
- Tous, J. (1999). *Nuevas tendencias en fuerza y musculación*. Ergo.
- Tous, J. (2005). Entrenamiento de la fuerza en los deportes colectivos. Máster Profesional en Alto Rendimiento; Deportes de Equipo. CEDE y Fundación FCB.
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Seitz, L. B., Williamson, B. D., & Haff, G. G. (2016). Maintenance of velocity and power with cluster sets during high-volume back squats. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *11*(7), 885-892.
- Tufano, J. J., Brown, L. E., & Haff, G. G. (2017a). Theoretical and practical aspects of different cluster set structures: a systematic review. *Journal of strength and conditioning research*, *31*(3), 848-867.
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Petkovic, A., Frick, J., & Haff, G. G. (2017b). Effects of cluster sets and rest-redistribution on mechanical responses to back squats in trained men. *Journal of Human Kinetics*, *58*, 35-43.
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Banyard, H. G., Williamson, B. D., Bishop, L. G., Hopper, A. J., & Haff, G. G. (2017c). Cluster sets: permitting greater mechanical stress without decreasing relative velocity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(4), 463-469.
- Tufano, J. J., Halaj, M., Kampmiller, T., Novosad, A., & Buzgo, G. (2018). Cluster sets vs. traditional sets: Levelling out the playing field using a power-based threshold. *PLoS One*, *13*(11), e0208035.
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Oliver, J. M., Kreutzer, A., & Haff, G. G. (2019). Different cluster sets result in similar metabolic, endocrine, and perceptual responses in trained men. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *33*(2), 346-354.
- Tufano, J. J., Omcirk, D., Malecek, J., Pisz, A., Halaj, M., & Scott, B. R. (2020). Traditional sets versus rest-redistribution: a laboratory-controlled study of a specific cluster set

- configuration at fast and slow velocities. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 45(4), 421-430.
- Twist, C., & Highton, J. (2013). Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 8(5), 467-474.
- Vanderthommen, M., & Crielaard, J. M. (2001). Electromyostimulation en médecine du sport. *Revue Medicale de Liege*, 56(5), 391-395.
- Vanderthommen, M., Depresseux, J. C., Dauchat, L., Degueldre, C., Croisier, J. L., & Crielaard, J. M. (2002). Blood flow variation in human muscle during electrically stimulated exercise bouts. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(7), 936-941.
- Varela-Olalla, D., Romero-Caballero, A., Campo-Vecino, D., & Balsalobre-Fernández, C. (2020). A cluster set protocol in the half squat exercise reduces mechanical fatigue and lactate concentrations in comparison with a traditional set configuration. *Sports*, 8(4), 45.
- Verjoshanski, I. V. (1990). *Planificación y Programación*. Ediciones Martínez Roca.
- Verkhoshansky, Y. V. (1996). Principles of a rational organization of the training process aimed at speed development. *New Studies in Athletics*, 11(2-3), 155-160.
- Verkhonshansky, Y. V. (2000). *Súper entrenamiento*. Ed. Paidotribo.
- Wagle, J. P., Cunanan, A. J., Carroll, K. M., Sams, M. L., Wetmore, A., Bingham, G. E., Taber, C. B., DeWeese, B. H., Sato, K., Stuart, C. A., & Stone, M. H. (2021). Accentuated eccentric loading and cluster set configurations in the back squat: A kinetic and kinematic analysis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 35(2), 420-427.
- Wahl, T., Haigh, I. D., Nicholls, R. J., Arns, A., Dangendorf, S., Hinkel, J., & Slangen, A. B. (2017). Understanding extreme sea levels for broad-scale coastal impact and adaptation analysis. *Nature Communications*, 8(1), 1-12.
- Walker, S., Blazevich, A. J., Haff, G. G., Tufano, J. J., Newton, R. U., & Häkkinen, K. (2016). Greater strength gains after training with accentuated eccentric than traditional isoinertial loads in already strength-trained men. *Frontiers in Physiology*, 7, 149.
- Ward, A. R., & Shkuratova, N. (2002). Russian electrical stimulation: the early experiments. *Physical Therapy*, 82(10), 1019-1030.

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Wasserman, K. (1984). The anaerobic threshold measurement to evaluate exercise performance. *American Review of Respiratory Disease*, 129(2P2), S35-S40.
- Wathen, D. (1994). Load assignment. In: T. R. Beachle (editor), *Essentials of strength training and conditioning* (pp.435-439). Human Kinetics.
- Watkins, C. M., Barillas, S. R., Wong, M. A., Archer, D. C., Dobbs, I. J., Lockie, R. G., ... & Brown, L. E. (2017). Determination of vertical jump as a measure of neuromuscular readiness and fatigue. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(12), 3305-3310.
- Wehbe, G. M., Hartwig, T. B., & Duncan, C. S. (2014). Movement analysis of Australian national league soccer players using global positioning system technology. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(3), 834-842.
- Weissenfels, A., Wirtz, N., Dörmann, U., Kleinöder, H., Donath, L., Kohl, M., ... & Kemmler, W. (2019). Comparison of whole-body electromyostimulation versus recognized back-strengthening exercise training on chronic nonspecific low back pain: a randomized controlled study. *BioMed Research International*, 2019, 574509.
- Welday, J. (1988). Should you check for strength with periodic max lifts? *Scholastic Coach*, 57(9), 49-68.
- Westcott, W. L., Winett, R. A., Anderson, E. S., & Wojcik, J. R. (2001). Effects of regular and slow speed resistance training on muscle strength. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 41(2), 154.
- Westerblad, H., Bruton, J. D., & Lännergren, J. (1997). The effect of intracellular pH on contractile function of intact, single fibres of mouse muscle declines with increasing temperature. *The Journal of Physiology*, 500(1), 193-204.
- Westerblad, H., Allen, D. G., & Lännergren, J. (2002). Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *Physiology*, 17(1), 17-21.
- Whitehead, N. P., Weerakkody, N. S., Gregory, J. E., Morgan, D. L., & Proske, U. (2001). Changes in passive tension of muscle in humans and animals after eccentric exercise. *The Journal of Physiology*, 533(2), 593-604.

- Willoughby, D. S., & Simpson, S. (1998). Supplemental EMS and dynamic weight training: effects on knee extensor strength and vertical jump of female college track & field athletes. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 12(3), 131-137.
- Wilmore, J. y Costill, D. (2007). *Fisiología del esfuerzo y del deporte*. Editorial Paidotribo.
- Wirtz, N., Wahl, P., Kleinöder, H., Wechsler, K., Achtzehn, S., & Mester, J. (2015). Acute metabolic, hormonal, and psychological responses to strength training with superimposed EMS at the beginning and the end of a 6 week training period. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 15(4), 325-332.
- Wirtz, N., Zinner, C., Doermann, U., Kleinoeder, H., & Mester, J. (2016). Effects of loaded squat exercise with and without application of superimposed EMS on physical performance. *Journal of Sports Science & Medicine*, 15(1), 26-33.
- Wirtz, N., Dörmann, U., Micke, F., Filipovic, A., Kleinöder, H., & Donath, L. (2019). Effects of whole-body electromyostimulation on strength-, sprint-, and jump performance in moderately trained young adults: a mini-meta-analysis of five homogenous RCTs of our work group. *Frontiers in Physiology*, 10, 1336.
- Yáñez-Sepúlveda, R., Pulgar-Gormás, N., Guajardo-Villegas, C., Rodríguez-Nercellas, F., Venegas-Ceballos, A., Macera-Sandoval, E., & Zavala-Crichton, J. P. (2017). *Efectos de un programa de entrenamiento polarizado: Somatotipo, composición corporal y autoestima en mujeres sedentarias*. XXII Congreso Argentino de Educación Física y Ciencias, Ensenada, Argentina.
- Zajac, A., Chalimoniuk, M., Maszczyk, A., Gołaś, A., & Lngfort, J. (2015). Central and peripheral fatigue during resistance exercise—A critical review. *Journal of human kinetics*, 49, 159–169.
- Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. A., Jo, E., Helms, E., Esgro, B., Duncan, S., García-Merino, S., & Blanco, R. (2016). Novel resistance training—specific rating of perceived exertion scale measuring repetitions in reserve. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 30(1), 267-275.
- Zubac, D., Ivančev, V., Valić, Z., Pišot, R., Meulenberg, C. J. W., Trozić, I, Goswami, N. & Šimunič, B. (2021). A Randomized Crossover Trial on the Acute Cardiovascular

- Demands During Flywheel Exercise. *Frontier in Physiology*, 25(12), 665462.
- Zubac, D., Obad, A., Ivančev, V., & Valić, Z. (2021). Acute flywheel exercise does not impair the brachial artery vasodilation in healthy men of varying aerobic fitness. *Blood Pressure Monitoring*, 26(3), 215-223.

ANEXOS



Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

11. ANEXOS.

11.1. ANEXO 1: CONSENTIMIENTO INFORMADO (ESTUDIO 1).

CONSENTIMIENTO INFORMADO



El propósito de este documento es informarle y solicitar su participación voluntaria en una investigación titulada *Análisis de la fatiga localizada (cuádriceps) y variables fisiológicas en diferentes medios de entrenamiento (Rack y Multipower) utilizando la EMS local tras un protocolo de entrenamiento de Fuerza Resistencia en el ejercicio de la sentadilla*. Realizada por el Doctorando Francisco Torres López de Haro y coordinada por el Prof. Rafael Timón Andrada de la UEX y desarrollada en el Estudio de Entrenamiento Personal del Golf Guadiana de Badajoz así como en la Facultad de Ciencias del Deporte de la UEX. A lo largo de dicha investigación los participantes serán sometidos a diferentes actividades y pruebas de valoración que se desarrollarán durante 5 días diferentes, a saber:

- Recogida de datos personales, antropométricos, así como la realización de un test para valorar la fuerza máxima del individuo en sentadilla, así como una familiarización con el trabajo voluntario combinado con la EMS en el ejercicio de la sentadilla. (Día 1).
- Realización de unos test de valoración de la capacidad de salto (Plataforma de contacto), y fuerza máxima isométrica de la musculatura posterior del muslo (Dinamometría). (Día 2).
- Realización de un entrenamiento de Fuerza en Multipower con EMS dentro de un programa protocolarizado de Fuerza Resistencia en COMPEX (día 2).
- Realización de un entrenamiento de Fuerza en Multipower sin EMS aunque siguiendo un programa protocolarizado de Fuerza Resistencia en COMPEX (día 3).
- Realización de unos test de valoración de la capacidad de salto (Plataforma de contacto), y fuerza máxima isométrica de la musculatura posterior del muslo (Dinamometría). (Día 4).
- Realización de un entrenamiento de Fuerza en Rack con EMS dentro de un programa protocolarizado de Fuerza Resistencia en COMPEX (día 4).

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

- Realización de un entrenamiento de Fuerza en Rack sin EMS aunque siguiendo un programa protocolarizado de Fuerza Resistencia en COMPEX (día 5).

La investigación estará controlada por personal titulado y cualificado. Los datos obtenidos serán usados con fines científicos para la mejora del conocimiento y no se utilizarán las muestras para otros estudios diferentes a los de esta investigación. El protocolo de recogida de datos será archivado, y a cada participante se le asignará una clave de tal modo que no pueda relacionarse la muestra e información obtenida con la identidad del sujeto. En caso de detectar, mediante las pruebas, cualquier tipo de incompatibilidad entre el evaluado y el programa de actividades, el equipo de evaluación le informaría y se suspenderían las pruebas o participaciones restantes. La participación en el proyecto no será recompensada económicamente.

Don/Doña _____, con DNI número _____, comprendiendo las características de la investigación expuesta y habiendo podido preguntar todo aquello que he considerado oportuno, conociendo que en toda actividad física puede existir riesgo (por ejemplo, molestias por cansancio o derivadas de patologías previas; agujetas, etc.), entendiendo que soy libre de abandonar el programa en cualquier momento sin necesidad de justificar mi retiro, ACEPTO LIBREMENTE COLABORAR CON EL PROGRAMA Y ESTUDIO MENCIONADO ANTERIORMENTE.

Y para que así conste, firmo el presente consentimiento.

Firma:

Nombre y apellidos: _____ DNI: _____

Badajoz a de de 20

11.2. ANEXO 2: CONSENTIMIENTO INFORMADO (ESTUDIO 2).**CONSENTIMIENTO INFORMADO**

El propósito de este documento es informarle y solicitar su participación voluntaria en una investigación titulada *Análisis de la fatiga localizada (cuádriceps) y variables fisiológicas en diferentes medios de entrenamiento (Rack y Yoyo Squat) tras un protocolo de entrenamiento de Fuerza Hipertrofia en el ejercicio de la sentadilla*. Realizada por el Doctorando Francisco Torres López de Haro y coordinada por el Prof. Rafael Timón Andrada de la UEX y desarrollada en el Estudio de Entrenamiento Personal del Golf Guadiana de Badajoz así como en la Facultad de Ciencias del Deporte de la UEX.

A lo largo de dicha investigación los participantes serán sometidos a diferentes actividades y pruebas de valoración que se desarrollarán durante 5 días diferentes, a saber:

- Recogida de datos personales, antropométricos, así como la realización de un test para valorar la fuerza máxima del individuo en sentadilla, así como una familiarización con la plataforma isoinercial (Yoyo Squat) en el ejercicio de la sentadilla. (Día 1).
- Realización de unos test de valoración de la capacidad de salto (Plataforma de contacto), y fuerza máxima isométrica de la musculatura posterior del muslo (Dinamometría). (Día 2).
- Realización de un entrenamiento de Fuerza hipertrofia en Rack (día 2).
- Realización de unos test de valoración de la capacidad de salto (Plataforma de contacto), y fuerza máxima isométrica de la musculatura posterior del muslo (Dinamometría). (Día 3).
- Realización de un entrenamiento de Fuerza hipertrofia en Yoyo Squat (día 3).

La investigación estará controlada por personal titulado y cualificado. Los datos obtenidos serán usados con fines científicos para la mejora del conocimiento y no se utilizarán las muestras para otros estudios diferentes a los de esta investigación. El protocolo de recogida

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

de datos será archivado, y a cada participante se le asignará una clave de tal modo que no pueda relacionarse la muestra e información obtenida con la identidad del sujeto. En caso de detectar, mediante las pruebas, cualquier tipo de incompatibilidad entre el evaluado y el programa de actividades, el equipo de evaluación le informaría y se suspenderían las pruebas o participaciones restantes. La participación en el proyecto no será recompensada económicamente.

Don/Doña _____, con DNI número _____, comprendiendo las características de la investigación expuesta y habiendo podido preguntar todo aquello que he considerado oportuno, conociendo que en toda actividad física puede existir riesgo (por ejemplo, molestias por cansancio o derivadas de patologías previas; agujetas, etc.), entendiendo que soy libre de abandonar el programa en cualquier momento sin necesidad de justificar mi retiro, **ACEPTO LIBREMENTE COLABORAR CON EL PROGRAMA Y ESTUDIO MENCIONADO ANTERIORMENTE.**

Y para que así conste, firmo el presente consentimiento.

Firma:

Nombre y apellidos: _____ DNI: _____

Badajoz a de de 20

11.3. ANEXO 3: DOCUMENTO DE TOMA DE DATOS SESIÓN DE FAMILIARIZACIÓN.



TOMA DE DATOS (SESIÓN DE FAMILIARIZACIÓN)

NOMBRE Y APELLIDOS				EDAD			ALTURA			
FECHA DE NACIMIENTO					PESO			FECHA		
EMAIL					TELÉFONO					
COMPOSICIÓN CORPORAL										
COMPARTIMENTO	CUERPO ENTERO	TRONCO		PIERNA DERECHA		PIERNA IZQUIERDA				
MASA MUSCULAR										
MASA GRASA										
MASA ÓSEA										

PROTOCOLO NSCA TEST 1RM				
PASOS	DESCRIPCIÓN	REPETICIONES TIEMPO	INTENSIDAD	SENTADILLAS
1	Calentamiento	5-10	40-60%	
2	Descanso + Estiramientos	1 Minuto		
3	Primera Serie	3-5	60-80%	
4	Descanso + Estiramientos	2 Minutos		
5	Segunda Serie	2-3	80-90%	
6	Descanso + Estiramientos	4 Minutos		
7	Tercera Serie	1	100%	
8	Descanso + Estiramientos	4 Minutos		
				(1RM FINAL)

PROGRESIÓN		
AREA CORPORAL	INCREMENTO KG	INCREMENTO %
Hemicuerpo superior	4-9 KG	5-10%
Hemicuerpo inferior	14-8 KG	10-20%

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla

En esta última prueba se indicarán las ud de energía máximas soportadas con el electroestimulador dentro del programa de F. Resistencia (Nivel 1) en 1 único bloque de 5 series a 3 repeticiones.

	1º SERIE	2º SERIE	3º SERIE	4º SERIE	5 SERIE
U. ENERGÍA					

11.4. ANEXO 4: COMISIÓN DE BIOÉTICA Y BIOSEGURIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA.



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA

Campus Universitario
Avda de Elvas, s/n
06071 - BADAJOZ

Tel.: 924 28 93 05
Fax: 924 27 29 83

NºRegistro: 163/2020

D. JOÃO NUNO MEIRELES DA SILVA GONÇALVES RIBEIRO, SECRETARIO DE LA COMISIÓN DE BIOÉTICA Y BIOSEGURIDAD DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

INFORMA: Que una vez analizada por esta Comisión, en su sesión celebrada el 10/12/2020, la solicitud de Proyecto de Investigación titulado “**Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla**”, cuyo Investigador Principal es D. Rafael Timón Andrada, ha decidido por unanimidad, valorar positivamente el precitado proyecto por considerar que se ajusta a las normas éticas esenciales cumpliendo con la normativa vigente al efecto.

Y para que conste y surta los efectos oportunos firmo el presente informe.

MEIRELES DA
SILVA GONCALVES
RIBEIRO JUAN
NUNO -
088446425

Firmado digitalmente por MEIRELES DA SILVA GONCALVES RIBEIRO JUAN NUNO - 088446425
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=8X125-088446425, givenName=JUAN NUNO, sn=MEIRELES DA SILVA GONCALVES RIBEIRO, cn=MEIRELES DA SILVA GONCALVES RIBEIRO JUAN NUNO - 088446425
Fecha: 2020.12.11 09:01:03 +01'00'

DE FRANCISCO
MORCILLO
JAVIER -
28946338X

Firmado digitalmente por DE FRANCISCO MORCILLO JAVIER - 28946338X
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES, serialNumber=8X125-28946338X, givenName=JAVIER, sn=DE FRANCISCO MORCILLO, cn=DE FRANCISCO MORCILLO JAVIER - 28946338X
Fecha: 2020.12.14 10:49:21 +01'00'

V.º B.º

Fdo.: Javier de Francisco Morcillo
Presidente por delegación de la
Comisión de Bioética y Bioseguridad

Análisis de la fatiga muscular y la percepción del esfuerzo en diferentes protocolos de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla