



ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Ciencias del Deporte

Estudio de los efectos agudos y tardíos de diferentes
configuraciones del entrenamiento de fuerza.
Propuesta de la pérdida de velocidad entre series
como indicador de fatiga neuromuscular.

Autor:

Jorge Miguel González Hernández

Directores:

Dr. D. Pedro Jiménez Reyes
Dr. D. Gonzalo Márquez Sánchez
Dra. Dña. Asta Tvarijonaviciute

Murcia, junio de 2020



ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado en Ciencias del Deporte

Estudio de los efectos agudos y tardíos de diferentes
configuraciones del entrenamiento de fuerza.
Propuesta de la pérdida de velocidad entre series
como indicador de fatiga neuromuscular.

Autor:

Jorge Miguel González Hernández

Directores:

Dr. D. Pedro Jiménez Reyes
Dr. D. Gonzalo Márquez Sánchez
Dra. Dña. Asta Tvarijonaviciute

Murcia, junio de 2020



AUTORIZACIÓN DE LO/S DIRECTOR/ES DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Pedro Jiménez Reyes, el Dr. D. Gonzalo Márquez Sánchez y la Dra. Dña. Asta Tvarijonavičiute como Directores de la Tesis Doctoral titulada “Estudio de los efectos agudos y tardíos de diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza. Propuesta de la pérdida de velocidad entre series como indicador de fatiga neuromuscular” realizada por D. Jorge Miguel González Hernández en el Departamento de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, autoriza su presentación a trámite dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98, en Murcia a 11 de junio de 2020

Pedro Jiménez Reyes

Gonzalo Márquez Sánchez

Asta Tvarijonavičiute

A mis padres, por ser mi mayor apoyo y mi mejor ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS

Tras casi cuatro años de intenso trabajo, coleccionando momentos, absorbiendo conocimientos y generando ideas, es inevitable acordarme de aquellas personas que me han ayudado a completar con éxito esta tesis doctoral. Miro al pasado y sonrío, orgulloso del esfuerzo realizado y agradecido a todos los que han confiado en mí y me brindaron su apoyo durante este proceso. Sin duda, esta tesis doctoral es la suma de todas las aportaciones que me han regalado cada una de las personas que enumero en las siguientes líneas.

Por lo visto, cuando tenía tres años, mi padre me insistía con la idea de que cuando fuera mayor, tenía que ser médico o arquitecto. Hasta que un día, le respondí que de mayor sería lo que yo quisiera ser. Parece que esas palabras poco comunes en un niño de esa corta edad marcaron a mis padres, y desde entonces se han propuesto ayudarme y apoyarme en todo lo posible para conseguir esa meta. Carmen Jose y Miki, sin duda son los principales responsables de todo lo bueno que estoy viviendo. Gracias por la educación en valores que me han proporcionado y por los grandes esfuerzos que han hecho para que pudiera estudiar y vivir lejos de casa con el fin de hacer realidad mis sueños y convertirme en alguien diferente. Incluso, sin comprender del todo esto en que invierto tanto tiempo, siempre he podido contar con sus consejos, sus palabras de aliento y, sobre todo, me han hecho sentir cerca de casa aún estando a tantos kilómetros de distancia. Gracias por su apoyo constante y por confiar en mí cuando nadie lo hacía. Sin duda, son los padres que cualquier hijo desearía tener.

A mis directores de tesis, gracias Asta Tvarijonaviciute por ofrecerte a ayudarme en esta aventura, aún siendo veterinaria. Esta cooperación es un ejemplo de la gran posibilidad que ofrece el trabajo multidisciplinar. Gracias por tus clases de estadísticas, tus valiosas correcciones y aportaciones en cada artículo y en este documento. La visión que tanto tú como José Cerón (mi director en la sombra) me han aportado, ha sido un grato aprendizaje. Gracias Cerón por tu ayuda continua, por cada uno de esos cientos de correos intercambiados, por tu infinta paciencia

y, sobre todo, por tus lecciones. Gracias por confiar en mí para ampliar la línea de investigación de tu laboratorio de veterinaria con el estudio en humanos deportistas.

Nada más llegar a la UCAM me abriste las puertas de tu laboratorio y me sumergiste en una línea de investigación que era poco conocida para mí y tengo que reconocer que has conseguido que me despierte un gran interés. Gonzalo Márquez, gracias por acceder a dirigir esta tesis y guiarme en este camino. Han sido muchas horas las que has invertido en mí y eso te lo agradeceré siempre. Son numerosos los momentos compartidos en el laboratorio, la sala de tutorías, cafeterías y en varios viajes, de los cuales me siento agradecido de haber podido aprender de ti. Porque, sinceramente, mi mayor interés siempre ha sido ese, aprender de los referentes que tengo a mi lado. Gracias por todo, Lalo.

Hace casi 10 años que te conozco y aún no he encontrado la manera de agradecerte todo lo que haces por mí. Has sido mi profesor en la carrera, mi entrenador, mi director de tesis e, incluso, me has demostrado ser un gran amigo, un hermano mayor. Gracias Pedro Jiménez Reyes, por trasmitirme la rigurosidad, la disciplina y el esfuerzo como medio para ser mejor profesional y mejor persona. Gracias por la confianza que has depositado en mí desde que estaba en el primer año de carrera, acompañarme en el Máster y seguir conmigo en esta Tesis Doctoral. Son innumerables las horas que has invertido en mi formación, las lecciones que me has regalado, los viajes que hemos realizado y las ideas que hemos discutido. Nunca podré olvidar esos paseos por Murcia, los entrenamientos en la pista, los almuerzos en Trabajo Social, las Torritas en el CI e infinidad de costumbres y experiencias que hemos compartido, donde no he dejado de aprender de ti. Conozco a poca gente que transmita con tanta pasión como tú lo haces y menos gente aún que luche tanto por sus objetivos. Eres un claro ejemplo de que los sueños se pueden alcanzar. Ojalá pueda enseñarle tanto a un alumno como tú lo has hecho conmigo. Tu apoyo y ejemplo han sido clave durante este proceso. Gracias por la paciencia y el respeto que me has mostrado, por presentarme a tanta gente que ha contribuido a que esta tesis mejore y, sobre todo, por ayudarme a crecer. Espero devolverte todo este esfuerzo consiguiendo las metas que nos hemos propuesto. Gracias por tanto, Peter.

Mi hermana tiene gran parte de culpa de la persona que soy a día de hoy. Siempre he crecido con la idea de protegerla, de ser su ejemplo y de enseñarle. Pero a medida que pasan los años me he dado cuenta de que soy yo quien aprende de ella y que es ella quien soluciona mis problemas. Sin duda has sido el mejor regalo que me han hecho papá y mamá. Gracias Sara por ser un apoyo tan importante. Estoy muy orgulloso de la mujer que te has convertido y tus conocimientos han sido una fuente de inspiración para confeccionar esta Tesis Doctoral.

Gracias a mis abuelos, César, Carmina, Miguel y Milagros. Todos ellos siempre han sido referentes para mí y nunca podré agradecer todo su cariño y la forma en que me han criado y educado. Gracias por lo cerca que les he sentido aún estando lejos de casa durante esta etapa. Abuelo Cesar, gracias por enseñarme el valor de las cosas bien hechas e inculcarme que el trabajo y la educación deben ser mi mejor carta de presentación. Gracias a toda mi familia por enseñarme que la distancia son sólo kilómetros. Estos últimos años he tenido la suerte de compartir más tiempo contigo, y debatir muchas ideas, además de animarme cada día con la tesis. Gracias primo Marcos ¡seguimos sumando!. Y cómo no, gracias tia Milu por ayudarme con tu segundo idioma.

Durante estos años lejos de casa siempre has estado apoyándome, nunca han faltado tus llamadas. Tus consejos han sido una gran guía en todo este camino y eso siempre te lo agradeceré. Gracias primo Jose Domingo; desde pequeño siempre he querido parecerme a ti por tu capacidad de lucha y de superación.

Todo este proceso se lleva mejor con amigos como Mario Pérez, Mario González, Aarón Baez, Lauren Olivia, María Espinosa, André Barbuzano, Fernando Cabrera, Borja Elías, Alberto García y Carlos Murcia. Gracias por haber sido un gran apoyo y ser de los que más han sufrido la dedicación que he tendido a la tesis, y por la que he tenido que renunciar a muchos planes con ellos. Gracias por haber estado a mi lado aún estando lejos. Gracias Alejandro Oliva, por ser un auténtico hermano para mí. Desde que me fui de casa has estado de forma incondicional a mi lado, visitándome en cada uno de mis destinos y has sido mi aliado en la isla estando fuera.

La primera investigación de esta tesis comenzó con ustedes dos, unos jóvenes muy curiosos y ambiciosos, guiados por Pedro. Además, he tenido la suerte de llegar a otro continente empujados por nuestras ideas. Gracias, amigos Raúl Andrés y Antonio García -Peñuela. por haber sido una fuente de motivación y un impulso para mí.

Sin duda has sido de las personas que más ha sufrido los esfuerzos que he tenido que realizar durante esta etapa. Siempre te estaré agradecido por haber formado parte de ella, apoyarme y motivarme a seguir, aportándome la confianza necesaria para saber que lo conseguiríamos. Muchas gracias, Súper.

Durante este último año has sido una persona clave en mi desarrollo profesional, me has ayudado a pensar más allá y tener otra visión del entrenamiento. He podido discutir y debatir diferentes puntos de vista casi a diario, forzándome a argumentar y respaldar mis ideas. Además, me has sugerido propuestas para confeccionar este manuscrito, por lo tanto, no puedo dejar de mencionarte en estas líneas. Gracias, Kala, por confiar en mí, enseñarme tanto y, cómo tú dices, ser mi “padre deportivo”.

El día a día se hace más productivo cuando compartes opiniones e ideas con compañeros de doctorado y profesores. Gracias David Colomer, Adrián Castaño, Fernando Capelo, Luis Manuel Martínez, Fernando Llorente, Alexander Gil, Víctor Cuadrado y María Cadenas por hacerme crecer, por compartir sus conocimientos conmigo y por mostrarme siempre vuestro apoyo.

He tenido la suerte de aprender de ti, de tu habilidad para escribir papers, de tu capacidad y creatividad para diseñar estudios de investigación y de tu magia jugando al fútbol. Gracias Amador García Ramos por ser un gran apoyo desde que nos presentaron, por invitarme a Chile para mi estancia y por todo lo que me has enseñado. Eres un gran investigador, pero, sobre todo, eres una gran persona y un amigo.

Durante mi estancia en el laboratorio Pleokinetic de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, en Chile, se preocuparon por mí, me acogieron y me

hicieron sentir como en casa. Además, medieron absoluta libertad en su laboratorio para llevar a cabo parte de esta tesis doctoral y otros trabajos. Gracias a David Ulloa, Jesualdo Cuevas y a sus respectivas familias. Son la razón por la que volveré a Chile.

During this doctoral thesis I was lucky enough to have the help of international researchers. I have been able to learn a lot from you and we have built up an interesting research network. Thank you, Daniel Boullosa, James Tufano and Danica Janicijevic, for all the effort put into this project

No puedo acabar este apartado sin antes agradecer a cada uno de los sujetos que han participado en los estudios que confeccionan esta Tesis Doctoral. Sin su compromiso desinteresado nada de esto hubiera sido posible y nuestras ideas solo serian teorías. Muchas gracias a los enfermeros Alejandro Navarro y Jérica Rojas por realizar las extracciones de sangre durante los estudios. Gracias a Lorena Franco por el análisis de las muestras de sangre y saliva. Gracias al resto de coautores que han participado en los estudios de esta Tesis Doctoral. Y gracias a los deportistas y entrenadores del Club Atletismo Clator, al Juvenil Nacional del Progreso FC, al Alevín-B UCAM CF y al Juvenil-C del Club Deportivo Tenerife, donde he estado trabajando y me han permitido poner en práctica todo lo que aprendido durante este proceso.

He de reconocer que resumir toda la ayuda que me han prestado en estas páginas ha sido una tarea complicada. Espero no olvidarme de nadie. Sin más, gracias a cada uno de ustedes por ayudarme a mejorar y por acercarme al sueño de ser Doctor.

“El valor de un sentimiento se mide por la cantidad de sacrificio que estás preparado a hacer por él”

John Galsworthy

ÍNDICE

I/ INTRODUCCIÓN	51
II/ ORIGEN DE LA PROBLEMÁTICA OBJETO DE ESTUDIO	61
III/ ESTADO ACTUAL DE CONOCIMIENTO	69
3.1. Entrenamiento de fuerza y rol de la fuerza en las nuevas tendencias de entrenamiento	71
3.2. Factores determinantes del rendimiento de fuerza	75
3.2.1. Factores Mecánicos / estructurales	76
3.2.1.1. Área de Sección Transversal	76
3.2.1.2. Ángulo de Penneación	77
3.2.1.3. Tipo de Fibras	78
3.2.2. Factores Neurológicos	78
3.2.2.1. Reclutamientos de Unidades Motoras	79
3.2.2.2. Frecuencia del Estímulo	79
3.3. Variables determinantes de la configuración de las series	80
3.3.1. Volumen	80
3.3.2. Intensidad	82
3.3.2.1. Repeticiones a realizar en función de las realizables	82
3.3.2.2. X-RM y Velocidad de ejecución	84
3.3.2.3. Índice de Esfuerzo	87
3.3.2.4. Tiempo de recuperación	87
3.3.2.5. Percepción del Esfuerzo a través de escalas subjetivas de percepción del esfuerzo	92
3.3.3. Frecuencia	94
3.3.4. Tiempo bajo Tensión TUT	95
3.4. Papel Modulador de la Fatiga en el entrenamiento de fuerza	96
3.4.1. Fatiga Central y Periférica	97
3.4.1.1. Indicadores Bioquímicos	102
3.4.1.1.1. Estrés metabólico	103
3.4.1.1.2. Marcadores de daño muscular	104

3.4.2. Indicadores Mecánicos de fatiga	107
3.4.2.1. Contracción Isométrica máxima	107
3.4.2.2. Pérdida de Velocidad de Ejecución	108
3.4.2.3. Pérdida de Altura de Salto	110
3.4.2.4. Velocidad 1m/s en Sentadilla y Press de Banca	111
3.4.2.5. Relación Fuerza Velocidad	112
3.4.3. Indicadores Metabólicos de Fatiga	113
IV/ FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	119
V/ OBJETIVOS E HIPÓTESIS	125
VI/ METODOLOGÍA	131
6.1. Sujetos	134
6.2. Ejercicios	136
6.3. Variables de estudio	137
6.4. Test y materiales	138
6.4.1. Saltos con Contramovimiento CMJ (ESTUDIO I)	138
6.4.2. Test de detección de la carga del 1RM y 10 RM (ESTUDIOS I-V)	139
6.4.3. Pérdida de Velocidad	141
6.4.4. Test Lactato	141
6.4.5. Escala Subjetiva de Percepción del Esfuerzo OMNI	142
6.4.6. Perfil Fuerza-velocidad	142
6.4.7. Evaluación de la Función Neuromuscular	143
6.4.8. Extracción de Sangre y determinación de los valores de Estrés Metabólico y Daño Muscular	145
6.4.9. Extracción de Saliva y determinación de los valores de Estrés Metabólico y Daño Muscular	146
6.5. Procedimientos	147
6.5.1. Estudio I	147
6.5.2. Estudio II	148
6.5.3. Estudio III	149
6.5.4. Estudio IV	150
6.5.5. Estudio V	151

VII/ ESTUDIO I: Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat	159
7.1. Introduction	163
7.2. Methods	165
7.2.1. Experimental approach to the problem	165
7.2.2. Subjects	167
7.2.3. Procedures	168
7.2.4. Set configurations	169
7.2.5. Measures of fatigue	170
7.2.6. Statistical analyses	171
7.3. Results	172
7.3.1. Mechanical responses	172
7.3.2. Metabolic responses	177
7.3.3. Perceptual responses	178
7.4. Discussion	179
7.5. Practical applications	182
7.5.1. Conflict of Interest Statement	182
7.5.2. Acknowledgments	182
VIII/ ESTUDIO II: Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva	185
8.1. Introduction	189
8.2. Materials and methods	190
8.2.1. Experimental Approach to the Problem	190
8.2.2. Subjects	191
8.2.3. Procedures	191
8.2.4. Statistical analyses	193
8.3. Results	193
8.4. Discussion	196
8.5. Conclusion	198
IX/ ESTUDIO III: Effect of different intersets rest intervals on movement velocity during the squat and bench press exercises	201
9.1. Introduction	205
9.2. Methods	207
9.2.1. Participants	207

9.2.2. Experimental Design	207
9.2.2.1. Experimental sessions (sessions 4-6)	208
9.2.3. Statistical Analysis	210
9.3. Results	210
9.4. Discussion and implications	215
9.5. Conclusion	218
X/ ESTUDIO IV: Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol	221
10.1. Abstract	225
10.2. Introduction	225
10.3. Methods	228
10.3.1. Experimental approach to the problem	228
10.3.2. Subjects	228
10.3.3. Procedures	229
10.3.4. Serum and saliva samples	230
10.3.5. Statistical analyses	230
10.4. Results	231
10.5. Discussion	235
10.6. Practical applications	238
XI/ ESTUDIO V: Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue	241
11.1. Abstract	245
11.2. Introduction	245
11.3. Methods	247
11.3.1. Experimental approach to the problem	247
11.3.2. Subjects	248
11.3.3. Procedures	249
11.3.4. Statistical analysis	251
11.4. Results	252
11.4.1. Reliability of baseline values	252
11.4.2. Mean velocity during training	252
11.4.3. Neuromuscular function	252
11.4.4. Biomarkers of muscle damage	254

11.4.5. The effects of a matched volume on fatigue-related variables	254
11.4.6. Correlation analysis	255
11.5. Discussion	256
11.6. Practical applications	259
XII/ DISCUSIÓN GENERAL	261
12.1. Efectos mecánicos	264
12.1.1. La pérdida de velocidad	264
12.1.2. Pérdida de altura de Salto en CMJ	268
12.1.3. Perfil Fv	270
12.2. Efectos metabólicos	271
12.3. Efectos perceptuales	272
12.4. Efectos bioquímicos	273
12.5. Efectos Neurológicos	279
XIII/ CONCLUSIONES	285
XIV/ APLICACIONES PRÁCTICAS	293
XV/ LIMITACIONES	299
XVI/ FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	305
XVII/ REFERENCIAS	311
XVIII/ ANEXOS	363

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AST	Aspartate Aminotransferase / Aspartato Aminotrasferasa
ATP	Adenosine Triphosphate / Adenosín Trifostato
AU	Uric Acid / Ácido Úrico
BP	Bench Press / Press de Banca
BPT	Bench Press Throw / Press de Banca Lanzado
CK	Creatine Kinase / Creatina Kinasa
CL	Cluster Training / Entrenamiento Cluster
CMJ	Counter movement Jump / Salto con contramovimiento
CSA	Cross Sectional Area / Sección de Área Transversal
F₀	Maximal Theoretical Force / Fuerza Teórica Máxima
H	Hydrogen / Hidrógeno
Hz	Hertz / Hercios
ICCs	Intraclass Correlation Coefficient / Coeficiente de correlación Intraclases
IL	Interleukins / Interleucinas
IRR	Inter Repetitions Rest / Recuperación Entre Repeticiones
LACT	Lactate / Lactato
LDH	Lactate Dehydrogenase / Lactato Dehidrogenasa
MPV	Mean Propulsive Velocity / Velocidad Media Propulsiva
MVC	Maximal Voluntary Contraction / Contracción Máxima Voluntaria
PAP	Post Activation Potentiation / Potenciación Post Activación
P Fv	Force Velocity Profile / Perfil Fuerza velocidad
PCr	Phosphocreatine / Fosfocreatina
Pi	Inorganic phosphate / Fosfato Inorgánico
Pmax	Maximal Power / Potencia Máxima
RIR	Repetitions in Rest / Repeticiones en reserva
RM	Repetition Maximum / Repetición máxima
RPE	Rated Perceived Exertion / Percepción Subjetiva del Esfuerzo
RT	Resistance Training / Entrenamiento de Fuerza
sAA	Salivary Alpha Amylase / Alfa Amilasa Salival

SNC	sistema Nervioso Central
SQ	Squat / Sentadillas
TIT	Twitch Interpolated Techinque / Estimulación electrica superimpuesta
TLF	Training Leading to the failure/ Entrenamiento hasta el fallo
TNLF	Training Not Leading To the failure / Entrenamiento has el no fallo
TR	Traditional Training / Entrenaminto Tradicional
TUT	Time Under Tension/ Tiempo bajo Tensión
V₀	Vaximal Theoretical Velocity / Velocidad Teórica Máxima
VA	Voluntary Activation/ Activación Voluntaria

ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y FÓRMULAS

Figura 1: Ejemplo de cálculo de la pérdida de velocidad en un entrenamiento de sentadilla de 3 series de 10 repeticiones con 5 minutos de recuperación entre series, con el peso del 10RM (datos propios de nuestras investigaciones).	47
Figura 2: Escala de Percepción Subjetiva del Esfuerzo OMNI	92
Figura 3: Registro de fuerzas durante una Contracción Isométrica Máxima con estimulación eléctrica superimpuesta (Twitch Interpolation Technique) durante la contracción y en reposo para la determinación de la fatiga central y periférica de la musculatura extensora de rodilla.	99
Figura 4: Metodología Estudio 1	153
Figura 5: Metodología Estudio 2	154
Figura 6: Metodología Estudio 3	155
Figura 7: Metodología Estudio 4	156
Figura 8: Metodología Estudio 5	157
Figure 9: Traditional (TR; no rest between repetitions) and cluster set configurations (CL; a rest period was introduced between individual repetitions) analyzed in the present study. R: repetition.	169
Figure 10: Velocity loss observed for six set configurations analyzed. Results are presented as percent change from the first repetition of each testing session. Sets × repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 × 10 [0 s]; TR2 = 6 × 5 [0 s]; CL1 = 3 × 10 [10 s]; CL2 = 3 × 10 [15 s]; CL3 = 3 × 10 [30 s]; CL4 = 1 × 30 [15 s].	174
Figure 11: Countermovement jump (CMJ) height loss observed after the training sets (top panel) and the whole training session (low panel) in the six set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets × repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 × 10 [0 s]; TR2 = 6 × 5 [0 s]; CL1 = 3 × 10 [10 s]; CL2 = 3 × 10 [15 s]; CL3 = 3 × 10 [30 s]; CL4 = 1 × 30 [15 s].	176

- Figure 12:** Comparison of blood lactate concentration among the different set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets × repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 × 10 [0 s]; TR2 = 6 × 5 [0 s]; CL1 = 3 × 10 [10 s]; CL2 = 3 × 10 [15 s]; CL3 = 3 × 10 [30 s]; CL4 = 1 × 30 [15 s]. 177
- Figure 13:** Comparison of OMNI-RES vales among the different set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets × repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 × 10 [0 s]; TR2 = 6 × 5 [0 s]; CL1 = 3 × 10 [10 s]; CL2 = 3 × 10 [15 s]; CL3 = 3 × 10 [30 s]; CL4 = 1 × 30 [15 s]. 178
- Figure 14:** Overview of the experimental sessions. The order of the squat and bench press exercises performed during training and the intersets rest protocols (1, 3 or 5 minutes) was counterbalanced between participants. CMJ, countermovement jump; BPT, bench press throw; RM, repetition maximum; F-v, force-velocity. 208
- Figure 15:** Comparison of mean velocity between the different intersets rest protocols and number of sets for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'. NS, no significant differences between sets. 212
- Figure 16:** Comparison of mean velocity at each repetition between the intersets rest protocols of minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 minutes (Rest 5'; grey squares) for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. Error bars depict the standard error. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'. 213
- Figure 17:** Comparison of the maximal capacities of the muscles to produce force (upper-panel), velocity (middle panel) and power (lower panel) before (Pre) and after (Post) the training session for the intersets rest protocols of 1 minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 215

minutes (Rest 5'; grey squares) during the countermovement jump (CMJ; left panels) and bench press throw (BPT; right panels) exercises. Error bars depict the standard error. *, significant differences between Rest 1' and Rest 3'; #, significant differences between Rest 1' and Rest 5'; †, significant differences between Rest 3' and Rest 5'.

Figure 18: Comparison of Creatine kinase (CK) Aspartate aminotransferase (AST) and Lactate dehydrogenase (LDH) measured in serum between the three time points. The individual values (dots), averaged across the subjects values (bars) and standard deviations (error bars) are depicted. *, significantly lower than Post24 and Post96 ($p \leq 0.001$). 233

Figure 19: Bland-Altman plots (left hands panels) and association (right hand panels) of Creatine kinase (CK, upper panel), Aspartate aminotransferase (AST, middle panel) and Lactate dehydrogenase (LDH, lower panel) measured in serum and saliva. Each Bland-Altman plot depicts the averaged difference and 95% limits of agreement (dashed lines), along with the regression line (solid line). The Pearson's correlation coefficient (r) was calculated using the log-transformation since the assumption of homoscedasticity was violated. 234

Figure 20: Overview of the experimental protocol. Neuromuscular function and biochemical variables were measured before training (Pre) and 1 hour (Post_1h), 24 hours (Post_24h) and 48 hours (Post_48h) post-training following failure and non-failure protocols with the full squat exercise. TIT, twitch interpolation technique. 248

Figure 21: Comparison of maximal voluntary contraction (MVC; panel A), voluntary activation (VA; panel B), potentiated low- frequency doublet (Db10Hz; panel C) and the ratio of paired stimulation peak forces at 10 Hz over 100 Hz (10:100 ratio; Panel D) before (PRE) and after performing 30 repetitions (POST_30reps) between both training protocols. *, depicts significant differences from PRE values. #, shows significant differences between both training protocols. Data are depicted as means and standard deviations. 255

Figura 22: En esta figura se muestra el registro de las velocidades en un entrenamiento de fuerza en sentadillas de 3 series de 10 repeticiones con una recuperación de 5 minutos entre series, con el peso del 10RM (datos 267

propios de nuestras investigaciones). En recuadro verde con letras negras, se muestra la pérdida de velocidad en la serie a partir de la idea propuesta por Sánchez Medina y González Badillo. Mientras que, en letras azul, se muestra nuestra propuesta de pérdida de velocidad entre series.

Tabla 1: Resumen metodológico en cada estudio	133
Tabla 2: Características de lo sujetos participantes en cada estudio.	135
Tabla 3: Nueva de Metodologia	137
Table 4. Two-way repeated measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2 and 3) and repetitions (1-10) on movement velocity during each set configuration.	173
Table 5: Comparison of velocity loss (%) among the different set configurations.	173
Table 6: Two-way repeated measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2 and 3) and the time of measurement (pre-set and post-set) on countermovement jump height.	175
Table 7: Mean (interquartile range) data of serum and salivary UA before (Pre) and after 60 min (Post_60), 24 hours (Post_24), and 48 hours (Post_48) of acute exercise. TLF: training leading to failure, TNLF: training not leading to failure, TP: total proteins	194
Table 8: Comparison between uric acid values obtained in serum and in saliva using salivette and passive drool	195
Table 9: Correlation data between uric acid in serum and saliva.	196
Table 10: Three-way repeated measures ANOVA used to compare movement velocity between the exercises, sets, and rest protocols.	
Table 11: Three-way repeated measures ANOVA used to compare the force-velocity relationship parameters between the exercises, point of measure, and rest protocols.	214
Table 12: Descriptive values of the three muscle damage markers measured in serum and saliva at three time points.	231
Table 13: Comparison of mechanical, neuromuscular and biochemical variables between training sessions leading or not to failure.	253

Fórmula 1: Brzycki estimación del 1 RM	65
Fórmula 2: Brzycki estimación del 1 RM con datos	65
Fórmula 3: Pérdida de velocidad en la serie	85
Fórmula 4: Activación Voluntaria	145
Fórmula 5: Pérdida de velocidad entre series	267

RESUMEN

Durante el entrenamiento de fuerza, la forma en la que se establezcan las variables que afectan a la configuración de las series (tiempo de recuperación entre series o entre repeticiones, número de series o repeticiones, velocidad a la que se desplace la carga, o la relación de las repeticiones realizadas en función de las realizables) van a condicionar la orientación del entrenamiento al inducir unos efectos u otros. Son muchas las posibilidades que nos permite combinar estas variables y el conocimiento de los efectos que esto ocasiona necesita ser investigado en profundidad. Por ello, el propósito de esta tesis doctoral es estudiar los efectos agudos y tardíos de diferentes configuraciones de las series en el entrenamiento de fuerza, desde un punto de vista mecánico, metabólico, bioquímico, perceptual y neurológico y para ello se han diseñado los cinco estudios siguientes:

En el primero de ellos se compara el efecto mecánico, metabólico y perceptual de seis protocolos diferentes de entrenamiento de fuerza en sentadillas: Once estudiantes de Ciencias del Deporte realizaron dos protocolos tradicionales de repeticiones continuas (TR1:3x10 y TR2:6x5) y cuatro protocolos con recuperación entre repeticiones Cluster (CL1: 3x10 [10-s]; CL2: 3x10 [15-s]; CL3: 3x10 [30-s]; CL4: 1x30 [15-s]). Para cuantificar la fatiga mecánica se midió la velocidad de ejecución de cada repetición y tras cada serie la pérdida de altura de salto, al igual que el lactato como indicador metabólico y la percepción subjetiva del esfuerzo. Las variables estudiadas reportaron valores de fatiga significativamente mayores para el protocolo TR1, mientras que los dos protocolos que presentaron valores más bajos fueron CL2 y CL3. Por ello se propone al entrenamiento Cluster como una buena estrategia para generar pocos niveles de fatiga y pérdida del rendimiento.

En una segunda aproximación, se diseñaron dos protocolos diferentes de entrenamiento de fuerza en sentadillas, donde doce estudiantes de Ciencias del Deporte realizaban en uno de ellos repeticiones hasta el fallo (6x10) mientras que otro realizaba la mitad de las repeticiones posible por serie (6x5). Se estudió la respuesta del estrés metabólico mediante la concentración de ácido úrico en suero

y saliva, a través de dos métodos de recolección de la muestra (no estimulada, por flujo pasivo y estimulada, usando algodón) y tres procesos de normalización del metabolito (corregidos por flujo salival, por proteínas totales salivares y en valores absolutos, sin corregir). Se obtuvieron las muestras antes de entrenar y a los 60 min, 24h y 48h post entrenamiento. Se elucidaron resultados similares para ambos métodos de recolección. Las correlaciones de ácido úrico en el suero y la saliva se detectaron solo cuando se utilizaron valores absolutos ($r = 0.434$; $p < 0.001$). Por lo tanto, para evaluar estrés metabólico en deportistas los valores del ácido úrico salival tendrían que ser expresados en valores absolutos.

El tercer estudio tuvo como objetivo comparar el efecto de tres intervalos de descanso entre series (1,3 y 5 minutos) sobre (I) la velocidad media durante una sesión de entrenamiento de fuerza de sentadilla y press de banca, y (II) la relación fuerza-velocidad antes y después del entrenamiento. Quince estudiantes universitarios masculinos completaron tres sesiones con recuperaciones de 1, 3 y 5 min entre series respectivamente (Rec1', Rec3' y Rec5') que consistieron en tres series de cinco repeticiones con la carga de que podían realizar 10 repeticiones. La relación fuerza-velocidad se evaluó al principio y al final de cada sesión mediante los ejercicios de salto con contramovimiento y press de banca lanzado. La velocidad fue más lenta para el protocolo Rec1' en comparación con los otros dos, pero no hubo diferencias significativas entre estos últimos. Los resultados proponen el Rec3' como el protocolo más eficiente en el tiempo para el mantenimiento de la velocidad de ejecución durante las sesiones de entrenamiento sin llegar al fallo muscular.

El cuarto estudio tuvo como objetivo evaluar el daño muscular en suero y saliva tras un protocolo de entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado con la carga del 120% de la repetición máxima en sentadillas. Dieciséis estudiantes de Ciencias del Deporte (10 hombres y 6 mujeres) realizaron 8 series de 10 repeticiones alargando la fase excéntrica durante 3 segundos. Se realizaron extracciones de sangre y saliva antes del entrenamiento y a las 24 y 96h post. En suero se observaron niveles más altos de marcadores de daño muscular (Creatina Kinasa y Aspartato Aminotransferasa) a las 24 y 96h respecto al pre, pero sin diferencias significativas en entre los puntos temporales tras el entrenamiento. Mientras que,

en la saliva, únicamente se observó un aumento significativo en hombres post 96h para Creatina Kinasa. En cuanto al estudio de la correlación entre las mediciones en suero y saliva variaron de triviales a pequeñas ($r = -0.034$ a 0.212): lo que sugiere que los biomarcadores no se comportan de la misma manera y la saliva no es fiable para medir el daño muscular tras este tipo de entrenamiento.

El último estudio de esta tesis tuvo como objetivo evaluar el daño muscular y la fatiga producida en los extensores de rodilla tras el entrenamiento de fuerza al fallo y no al fallo en sentadilla. Doce estudiantes de Ciencias del Deporte completaron dos sesiones de entrenamiento de fuerza (una de ellas consistió en repeticiones hasta el fallo (6x10) mientras que en la otra realizaban la mitad de las repeticiones posible por serie (6x5)). La velocidad de ejecución fue medida durante cada repetición. La función neuromuscular de los extensores de rodilla se evaluó en línea base, inmediatamente después de cada serie y 1h, 24h y 48h después del entrenamiento mediante la estimulación eléctrica superimpuesta. Las extracciones de suero para la determinación del daño muscular se realizaron en línea base y 1h, 24 h y 48 h post. Los resultados de este estudio mostraron una significativa reducción de la velocidad de ejecución para el protocolo hasta el fallo. La activación voluntaria como indicador de fatiga central se vio comprometida hasta las 48h post. Y, por último, tanto la fatiga periférica como el daño muscular, fue significativamente mayor para el protocolo hasta el fallo. Lo que sugiere que el entrenamiento hasta el fallo produce un mayor descenso del rendimiento durante la sesión y ocasiona un mayor grado de fatiga hasta las 48h post entrenamiento. Además, se propone la pérdida de velocidad entre series como indicador de fatiga en el entrenamiento de fuerza.

Palabras clave: Sentadillas, Cluster, Saliva, Velocidad de Ejecución, Tiempo de Recuperación, Excentrico Acentuado, Fatiga Central y Periférica, Daño Muscular

ABSTRACT

Resistance training has proven to be a successful strategy for performance and health improvement. From a mechanical perspective, force is understood as any cause capable of modifying the state of a body either at rest or in motion, as well as the cause capable of deforming bodies, either by pressure or by tension. On the other hand, from a physiological point of view, strength is seen as the capacity to produce the tension that a muscle possesses when activated (González Badillo & Serna, 2002). The culture of resistance training has expanded significantly in recent years. More and more sports establish this ability as the basis of their physical preparation, it is a key element in most phases of a sports readjustment and, without a doubt, a major quality during developmental stages and old age. But it has not been easy. The conceptualization of strength has undergone a transformation that took several generations to take hold and gain the recognition it requires. There are many false beliefs and myths that accompany resistance training, from the idea that girls get very strong from training with weights to the idea that training in the gym makes the athlete slow. Fortunately, these ideas are becoming obsolete, thanks to the research work being carried out in the world of sports sciences, investigating the potential of working the force. Not only to improve sports performance, but also to improve health and quality of life, by combating and palliate various diseases such as sarcopenia, diabetes, hypercholesterolemia or metabolic syndrome. But this is not enough, the influence of the internet age and the non-scientific dissemination especially in social networks is doing a lot of damage. Strength training is a fashionable product and the emergence of new training methodologies has unleashed a maelstrom that is often not supported by scientific backing and that needs to go deeper into literature controversy to provide a logical theory of how it should be trained.

Many sports centres offer training programmes without any logical criteria as to the progression of the loads. Neither is the individualisation of training or simply taking into account the effect that occurs in a session for the next day. Collective classes or modalities such as Crossfit demolish many of the basic

principles of training, which opens a debate between the marketing that involves these modalities, supported by the good training environment and the mentality of “no pain, no gain”, which means that if you do not suffer while training, you do not improve. This idea is closely linked to training up to muscle failure, exhausting all possible repetitions, where quantity is of the utmost importance. As opposed to another current, somewhat more unusual to see in the job market, which guarantees getting the best out of the sportsman with the least possible effort, “no pain, more gain” prioritizing quality. This vision of training requires much more knowledge than the first one by the professionals who manage it, since it aims to provide the athlete with the minimum dose necessary to promote his improvement, keeping him away from overtraining and the risk of injury.

There is a great deal of research in the field of sports science, where it is possible to find many publications related to strength assessment and training. But it is necessary to go even deeper, as there is a lack of knowledge about the effects of varying the training settings of this physical quality. That is why it is necessary to investigate the response to these variations, providing results from a mechanical, perceptive, metabolic, neuromuscular and even biochemical perspective. In this way, physical trainers and sports professionals can be provided with an effective tool for understanding the response to various resistance training stimuli and for their work to be as optimal as possible.

During resistance training, the way in which the variables that make up the configuration of the sets are configured (rest time between series or between repetitions, number of sets or repetitions, movements velocity, or the relationship of the repetitions carried out according to those that can be achieved) will condition effect of training. There are many possibilities that allow us to play with these variables and the knowledge of the effects that this causes needs to be investigated in depth. Therefore, the purpose of this doctoral thesis is to study the acute and delate effects of different set configurations in resistance training, from a mechanical, metabolic, biochemical, perceptual and neurological point of view.

The following five studies have been designed with the intention of responding to the problems found in the literature. they can provide information

on the state of the athlete during training, just after finishing and how his recovery behaves days later. In addition, these studies have been carried out after different configurations of resistance training (different intra set rest and inter repetitions rest time, different number of repetitions depending on the achievable ones etc.) and studying different responses (rate of perceived exertion, movement velocity and jump height as mechanical indicators of fatigue, study of central and peripheral fatigue and biochemical response etc.). Aimed to provide a full perspective of these effects

In the first Study, the mechanical, metabolic and perceptual effect of six different squat resistance training protocols are compared: This study aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between two traditional (TR) and four cluster (CL) set configurations. In a counterbalanced randomized order, eleven men were tested with the following protocols in separate sessions (sets \times repetitions [inter-repetition rest]): TR1: 3 \times 10 [0-s]; TR2: 6 \times 5 [0-s]; CL1: 3 \times 10 [10-s]; CL2: 3 \times 10 [15-s]; CL3: 3 \times 10 [30-s]; CL4: 1 \times 30 [15-s]). The exercise (full squat), number of repetitions (30), inter-set rest (5 min), and resistance applied (10RM) was the same for all set configurations. The full squat was chosen because it is one of the most used exercises to improve lower-limb muscular strength (Schoenfeld, 2010a). The full study protocol was composed of seven sessions: one initial test session and six different protocol sessions. The warm-up and the procedure used to determine the 10RM load was identical for all subjects in all sessions. Subjects performed a 10-min standardized warm-up that included jogging, joint mobility exercises, two sets of eight repetitions in the unloaded squat, five progressive CMJs, and two sprints of 20 meters. Once the warm-up was completed, a progressive loading test in the full-squat exercise was performed until the load produced an MPV of 0.75 m \cdot s⁻¹ (\approx 10RM load according to Sánchez Medina and González Badillo). The initial external load was set at 40 kg for all subjects, and was progressively increased by 20 kg when the MPV was higher than 1 m \cdot s⁻¹, 10 kg when the MPV was between 1 m \cdot s⁻¹ and 0.8 m \cdot s⁻¹, and from 5 to 1 kg when the MPV was below 0.8 m \cdot s⁻¹. Four repetitions were performed when the MPV was above 1 m \cdot s⁻¹, two repetitions when the MPV was between 1 m \cdot s⁻¹ and 0.8 m \cdot s⁻¹, and only one repetition when the MPV was below 0.8 m \cdot s⁻¹. The recovery period between sets was three minutes and this test was carried out to determinate the load of training in each study of this thesis.

A linear encoder (Chronojump, Barcelona, Spain) was used to measure the velocity of the bar. Once the load linked to an MPV of $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was obtained, the subjects rested for five minutes, and then this load was lifted as many times as possible to determine whether this load was close to the 10RM or if a slight increment/decrement in the magnitude of the load was needed. This test was considered to be properly performed when the last repetition was lifted at an MPV lower than $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Luis Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Mechanical fatigue was quantified by measuring the mean propulsive velocity during each repetition, and the change in countermovement jump height observed after each set and after the whole training session. During the training sessions, metabolic and perceptual fatigue were assessed via the blood lactate concentration and the OMNI perceived exertion scale measured after each training set, respectively. The mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue were always significantly higher for the TR1 set configuration. The two set configurations that most minimized the mechanical measures of fatigue were CL2 and CL3. Perceived fatigue did not differ between the TR2, CL1, CL2 and CL3 set configurations. The lowest lactate concentration was observed in the CL3 set configuration.

In a second approach, two different squat resistance training protocols were designed, where twelve Sports Science students performed in one of them repetitions until failure (6x10) while the other performed half of the possible repetitions per set (6x5). The load was determined following the test described in the previous section during familiarization session. Then, in two randomized training sessions, the response of metabolic stress was studied by the concentration of uric acid in serum and saliva, through two methods of sample collection (non-stimulated - by passive drool and stimulated - using cotton roll) and three processes of metabolite normalization (corrected for salivary flow, corrected by total protein content and uncorrected). Samples were obtained before training and at 60 min, 24h and 48h post-training.

Three training sessions were performed starting with a pre-test, followed by two post-tests days (24 and 48h). First, pre-saliva and pre-serum extractions were carried out in fasting conditions. Afterwards, subjects had a breakfast (juice and a toast with tomato and olive oil). One hour later, they did a standardized

warm-up protocol, followed by training sessions of 50-60 min (including warm-up) which were supervised by researchers specialized in strength and conditioning training. Every session was performed in the morning at the same schedule for each individual (± 1 h), under constant environmental conditions (20 °C and 60% humidity).

Saliva and blood were sampled at four different times. First sample corresponding with baseline was taken at 8:30 AM. The second saliva and blood sample were collected 60 min post-training. Finally, the third and fourth extraction corresponded with 24 and 48h post-training. The order of collection was saliva by passive flow first, followed by collecting saliva using salivette and finally blood sample was collected. Participants were not allowed to eat, drink coffee or caffeinated soft drinks, and consume dairy products one hour before collecting saliva samples. Furthermore, five minutes prior to saliva collection participants were asked to rinse their mouth with clear water to avoid contaminations.

Specifically, saliva was collected applying two different procedures (i) passive flow during 1 min under supervision, using 5 mL standard microcentrifuge polystyrene tubes with round bottoms (12 X 75 mm) (Deltalab, 5 ml, Barcelona, Spain) (Contreras-Aguilar et al., 2017), (ii) salivette cotton roll (Sarstedt, Nümbrecht, Germany). Salivette rolls were chewed for 1 min and then placed into special centrifugation tubes. Each sample was refrigerated or stored on ice until arrival to the laboratory which was no longer than 45 minutes after sample collection. All the samples were firstly weighed and then centrifuged at 4.500 x g for 10 min at 4°C. The supernatant from whole saliva samples obtained by passive flow and saliva samples from the Salivettes were transferred to the 1.5 mL eppendorf tubes and stored at -80°C until analysis. In all cases the volume of saliva obtained was 1 mL minimum. After saliva collection, blood extractions were performed from the antecubital vein (5ml) into one plane tube to get serum (approximately 2 mLs) that was stored at -80°C until analysis. Uric acid was measured using a colorimetric commercial kit (Uric acid, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA) following the International Medicine (IFCC) method. This assay showed in saliva and serum less than 10% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution.

Salivary flow rate was obtained by dividing the volume of saliva by the time of the sampling period (1 min) (Contreras Aguilar et al., 2017; Rohleder & Nater, 2009). Saliva volume was obtained by subtracting the empty tube weight from the saliva-filled one, and values in grams obtained were considered equivalent to milliliters. UA amount was later multiplied by flow rate (mg/min). On the other hand, Saliva total protein quantification (Prot.T) expressed in mg/mL was done through a commercially available colorimetric kit for measuring urine and Low-Complexity Region (LCR) proteins (Protein in urine and CSF, Spinreact, Spain). This assay showed in saliva less than 15% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution. To express the values of uric acid normalized by protein content, in each sample the results from uric acid were divided by its total protein value (mg/mg). Similar results were elucidated for both collection methods. Correlations between uric acid in serum and saliva were detected when saliva samples were not corrected for salivary flow or total protein concentration ($r = 0.434$; $p < 0.001$).

The third study aimed to compare the effect of three rest intervals between sets (1,3 and 5 minutes) on (I) the average mean velocity during a squat and bench press strength training session, and (II) the force-velocity profile before and after training. Fifteen male university students completed three sessions (Rec1', Rec3' and Rec5') consisting of three sets of five reps with the load that they could perform 10 reps. The force-velocity profile was evaluated at the beginning and end of each session using the countermovement jump and bench press throw exercises. Movement velocity was slower for the Rec1' protocol compared to the other two, but there were no significant differences between the Rec3' and Rec5'.

A randomized crossover design was used to explore the effect of different intersets rest intervals during resistance training session on barbell velocity and the F-v relationship. Participants came to the laboratory on six occasions, twice a week, separated by at least 48 hours, over three consecutive weeks. Sessions 1-2 were used to ensure that all the participants could perform the full squats countermovement jump (CMJ), bench press and bench press throw exercises with proper technique against a variety of external loads. Session 3 was used to determine the 10RM load during the full squat and bench press exercises, as well as the external load

associated with a jump height of 12 cm during the CMJ exercise. The 10RM load determined in session 3 was applied during the remaining experimental sessions. Following previous studies, the external load associated with a jump height of 12 cm was used to determine the F-v relationship during the CMJ exercise in the three main experimental sessions (Garcia Ramos, Pérez Castilla, & Jaric, 2018).

The three main experimental sessions (sessions 4-6) consisted of three sets of five repetitions against the 10RM load during the full squat and bench press exercises. The only difference between the three experimental sessions was the intersets rest duration (1 minute [Rest 1'], 3 minutes [Rest 3'] and 5 minutes [Rest 5']). The order of the full squat and bench press exercises was counterbalanced between participants, but the same order was followed for individual participants in the three experimental sessions. The order of the intersets rest protocols was randomized. The F-v relationship during the CMJ and bench press throw exercises was determined on two occasions during each session: 5 min after the warm-up (Pre) and 10 min after the last set of the training session (Post). All sessions were performed at the same time of the day for each participant. During training, mean velocity was slower in sets 2 and 3 of the Rest 1' protocol compared to Rest 3' and Rest 5', but no significant differences were present between Rest 3' and Rest 5'. After training, there was a significant decrease in F0 ($p = 0.017$) and Pmax ($p = 0.010$), but not in v0 ($p = 0.259$).

In a fourth investigation, the aimed were (I) to examine the acute and delayed responses of three muscle damage biomarkers: creatine kinase (CK), aspartate aminotransferase (AST) and lactate dehydrogenase (LDH) to an accentuated eccentric training protocol in serum, and (II) to explore the changes of these biomarkers in saliva and compare them with serum. Sixteen resistance-trained university students (10 men [age = 26.6 ± 4.8 years, full squat one-repetition maximum [1RM] = 103.4 ± 14.4 kg] and 6 women [age = 22.7 ± 1.4 years, full squat estimated 1RM = 68.3 ± 10.5 kg]) completed an accentuated eccentric strength training protocol with the full squat exercise consisting of 8 sets of 10 repetitions against the 120% estimated 1RM load. The duration of the eccentric phase was set at 3 seconds and 5 minutes of rest were implemented between successive sets. Subjects came to the laboratory on four occasions. The first session was used to familiarize the subjects with the

saliva extraction process, determine the estimated 1RM load during the full squat exercise, and certify that all of subjects were able to perform the eccentric full squat protocol with a proper technique. The second one after 72 hours of rest to perform the eccentric strength training protocol. Serum and saliva samples were collected at the beginning of session 2 (Pre), 24 hours after training (session 3; Post24) and 96 hours after training (session 4; Post96). Extractions of serum and saliva were always conducted in the morning (0800-0930 hours) at rest and fasting. In serum, lower values of the three muscle damage markers were observed at Pre compared to Post24 and Post96, while no significant differences were observed between Post24 and Post96 for any analyte. In saliva, there was a significant increase in men at Post96 compared with Pre in CK. The correlations between the measurements in serum and saliva ranged from trivial to small ($r = -0.034$ to 0.212).

As last study of this thesis, a repeated-measures design was used to compare the acute and delayed knee extensor fatigue and muscle damage following resistance training leading or not to muscle failure conducted with the full squat exercise. Twelve Sports Science students completed two resistance training sessions (one of them consisted of repetitions until failure (6x10) while the other one performed half of the possible repetitions per set (6x5)). Each subject was involved in 2 familiarizations and 2 experimental sessions with a break of 1 week in-between. The familiarization was performed 1 week before the first experimental session and it was conducted to acquaint the subjects with the full squat exercise, as well as to establish the individual 10RM load (the load that induced failure after 10 repetitions) and avoid the possibility of induce repeated bout effect in the course of the experimental session. During this session, subjects were also required to perform two maximal voluntary isometric contractions (MVCs) with and without electrical stimulation in order to familiarize them with the neuromuscular function test.

After the familiarization session, participants undertook 2 different RT sessions (TLF vs TNLF) in a counterbalanced order 1 week apart. Each session consisted of 6 sets of full squats with a 10RM load (~75% 1RM). The protocols only differed in the actual number of repetitions performed in each set in relation to the maximum possible number of repetitions. One protocol demanded a maximum number of repetitions in each set (TLF: 6x10[10]), whereas in the second protocol

participants were asked to perform only half the maximum number of repetitions that would be allowed (TNLF, 6×5[10]). The inter-rest set was 5 minutes for both protocols and participants were instructed to perform the concentric phase as fast as possible (maximal intended velocity) and three seconds were set for the eccentric phase. The movement velocity was measured during each repetition. Also, the twitch interpolation technique was used to assess voluntary activation and muscle contractile properties before (Pre), immediately after each set (Set_1...Set_6), and 1h (Post_1h), 24h (Post_24h) and 48h (Post_48h) post training. Muscle damage markers (CK and AST) were inferred via serum measures obtained before and after (Post_1h, Post_24h and Post_48h) each training protocol. Each training session was performed at the same time of the day for each subject and under constant environmental conditions (20-22 °C and 55-60% relative humidity).

Our results displayed a higher reduction of the MPV during TLF (-21.7%) than during TNLF (-3.5%). Furthermore, peripheral fatigue was higher during TLF than during TNLF ($p < 0.05$). Voluntary activation remained depressed up to 48h (~-7.5%) regardless of the training protocol, indicating the persistence of central fatigue. TLF induced higher muscle damage than TNLF, which lasted up to 48h post-training (CK: +111.9%; AST: +27.6%; $p < 0.05$). Changes in CK and MVC were also correlated

For the first study, we can conclude that the different Cluster protocols with recovery time between repetitions that we have studied have reported significantly less mechanical, metabolic and perceptual fatigue after a squatting training session and with the 10RM load, reporting better results the protocols CL2 and CL3. However, the CL2 set configuration presents two main advantages with respect to CL3: (1) it reduces training session duration, and (2) it promotes higher metabolic stress, which to some extent may be beneficial for inducing muscle strength and hypertrophy gains. On the other hand, all the cluster protocols evaluated have managed to maintain higher values of mean propulsive velocity during squats compared to the traditional set configuration of continuous repetitions. Hence, this mean better performance per session. Although speculative, we suggest the possible influence of a post-activation potentiation (PAP) phenomenon that counteracts the negative influence of fatigue during recovery, thus minimizing the loss of headroom

in CMJ after the CL4 (1x30 IRR 15") configuration. Ultimately, these results propose Cluster training as a great strategy for training with low levels of fatigue and loss of performance.

In the second approach, our results revealed the importance of an adequate methodology for obtaining the samples and expressing the results when the metabolites are measured in saliva has been proven. When comparing the use of Cotton and Passive Fluid Salivettes for saliva extraction and later determination of metabolic stress from uric acid, we could conclude that both methods are valid since they did not present significant differences between them with respect to serum samples. Finally, an evaluation process of these metabolites was carried out without correcting the values (mg/dL). The latter methodology which did not correct for uric acid values showed the highest correlation with reported serum. Therefore, this study highlights the importance of choosing an adequate sampling method selection as well as the expression of results when analytes are measured in saliva

In the third study, when comparing the mean velocity of the squat and bench press reps in three training sessions consisting of 3 sets of 5 reps, each with different rest times (1-3 and 5 min), significantly lower values of mean velocity can be seen in the 1 min rest protocol compared to the 3 and 5 min reps. On the other hand, for the configuration of the series chosen in our research (3x5(10)) when retrieving 3 or 5 min between series no significant differences were found in terms of performance when evaluating the mean velocity in squats and bench press. Finally, after performing squat and bench press training with half the level of the effort (3x5(10)), studying the residual fatigue, regardless of the recovery time (1-3 or 5 min), the parameters of the F-V ratio were not affected. Therefore, the results of this study propose Rec3' as the most efficient protocol in time for maintaining movement velocity during training sessions not leading to the muscle failure.

In our fourth study, the results showed that after the eccentric strength training accentuated in squats with 120% MRI we could only find a significant increase of Creatine Kinase in saliva for men at 96h Post Training. This implies a low level of similarity between the values of this muscle damage marker in serum and saliva.

Moreover, the lack of correlation between serum and saliva values found in our research could be due, among other causes, to different dynamics of the enzymes CK, AST and LDH in serum and saliva. It seems that the response in saliva is later than in serum, which makes us think that measuring these values hours later could give us more related values, even if they are far from the practice, since it means a long waiting time to know the induced damage. So, our results suggest that the measurement of muscle damage markers in serum and saliva do not provide the same information in the conditions of our study.

In the last study, when is compared two squat resistance protocols, one leading to failure and one not leading to the failure, we have seen how, based on the acute response, the protocol leading to the failure induced a significant decrease in the movement velocity during the fifth and sixth sets. While, studying the delay response, we can appreciate how both training protocols produced a significant loss of maximum voluntary contraction, remaining affected even 24 hours after training. Predictably leading to failure protocol produced significantly higher levels of peripheral fatigue right after training and higher levels of muscle damage at all measured times than training not leading to the failure. Although for both configurations of the sets, the maximum values of muscle damage and peripheral fatigue have been reported to coincide at the Post 1 hour time. On the other hand, voluntary activation was reduced even to 48 hours after training for both protocols, indicating the inability of the nervous system to recruit the entire motor neuron pool. Finally, the result of the last study suggests that training leading to the failure produces a greater decrease in performance during the session and causes a greater degree of fatigue until 48 hours after training

Moreover, as novelty, the velocity loss between sets has been successfully used to quantify mechanical fatigue during strength training to failure and not failure. According to previous research (JJ Gonzalez-Badillo et al., 2016; Juan José Gonzalez-Badillo et al., 2017; F Pareja-Blanco et al., 2016; Luis Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) training until failure generated a significant decrease in movement velocity, when compared to the protocol until failure. In these publications and in our previous studies (Study 1 and Study 3), we observed the velocity loss during the sets, comparing the percentage difference between the fastest (usually the first) and

slowest repetition of each series (usually the last). According to this interpretation, the fatigue generated at the end of the session would be known by averaging the velocity losses suffered in each of the sets. It was Sánchez Medina and González Badillo in 2011 who proposed this excellent strategy to quantify the neuromuscular fatigue during resistance training. But in this methodology, the state of the athlete is not considered at the beginning of each sets, since as fatigue appears, the faster repetition of each series, it decreases. Therefore, it is normal to see how the velocity value at the beginning of each sets does not match, being higher in the first set, especially during the training leading to the failure. In the opposite position, the value of the slowest repetition, if usually similar between series, especially when all possible repetitions are exhausted. This causes the first sets to experience a greater loss of movement velocity than the last, since there is a greater difference between the movement velocity of the fastest and slowest repetition of each set, which may imply that the first sets generates more fatigue than the last.

It is then, when we think of measuring the velocity loss between sets as a percentage, examining the decrease of the movement velocity values between the fastest repetitions of each series (usually the first repetitions). In this way, we can see how fatigue is affected during rest times and we can see how the value of velocity loss increases when is completed more sets.

This proposal for measuring fatigue is not intended to go against what we already know, but to complement it. We consider this method to be more accurate when we want to take into account the athlete's ability to recover between sets, which will be related to the recovery time used. In our research, the protocol leading to the failure induced a velocity lost between sets of -21.7%, while not leading to the failure protocol only led to a reduction of -3.5%. These values cannot be compared with those reported by similar configurations in other studies, where when taking into account the velocity loss in each set, training to failure shows a reduction of around -40%, while training not leading to failure shows a decrease of around -20% (Gonzalez Badillo et al., 2016). Therefore, the velocity loss between sets can be seen as a novel method of quantifying neuromuscular fatigue on a mechanical level during resistance training.

The main practical applications proposed from the evidence found in the studies that make up this thesis that our results could help trainers to design, dose and adjust strength training programs by understanding the effect of training with different setups in the series, varying the recovery time between repetitions and between sets, emphasizing the eccentric phase, varying the volume or character of effort. Also, based on the results of our research, there were no significant differences between the protocols with recovery between 15- and 30-second reps, with the two reporting lower values of fatigue. This proposes the protocol of 30 seconds between repetitions as a valid method for training programs in which high velocity and low fatigue are sought, oriented to moments of competition or to avoid plateau. While 15 seconds recovery between repetitions may be recommended due to (I) the session being shorter than with 30 seconds, or (II) if the goal is to produce some more metabolic stress during high velocity repetitions in order to improve strength and hypertrophy levels. On the other hand, the use of saliva for the measurement of metabolic stress from uric acid originated after resistance training, can be an effective and simple methodology as long as it is collected and expressed correctly. Therefore, the use of saliva is proposed as a tool that presents advantages over blood extractions since it is a faster and cheaper way to know the metabolic stress suffered during a resistance training session. Also, one minute of rest are not enough to maintain performance in squat and bench press when training with half the character of the effort. In addition, no significant performance differences are found between the 3 and 5 minute recoveries for a squat and bench press strength training with half the character of the effort, the use of the 3 minutes can be recommended to optimize performance in the outside session, as the duration is shorter.

It should also be noted that the measurement of muscle damage markers in saliva after resistance training are not reliable, so they must be measured in serum. Therefore, the high variability in individual serum CK, AST and LDH responses to the stressed eccentric training protocol in our research suggests that coaches cannot extrapolate the results reported in the literature to their athletes, and individual monitoring of these biomarkers is necessary.

The resistance training sessions, even if performed with half the level of the effort, may cause voluntary activation not to be recovered even up to 48 hours after training. What coaches should use to manage the rest and design the following training sessions. Also training until failure has proven to be an effective strategy to optimize performance, with less mechanical, neuromuscular and metabolic stress than training until failure. Finally, to take into account the velocity loss between sets will give us a more accurate view of how the athlete recovers between each series.

Keywords: Squats, Cluster, Saliva, Movement Velocity, Rest Time, Accentuated Eccentric Training, Central and Peripheral Fatigue, Muscle Damage

I

Introducción

I/ INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de fuerza ha demostrado ser una estrategia clave para la mejora del rendimiento y de la salud. Desde una perspectiva mecánica, la fuerza es entendida cómo toda causa capaz de modificar el estado de un cuerpo ya sea en reposo o en movimiento, así como la causa capaz de deformar los cuerpos, bien por presión o por tensión. Por otro lado, desde el punto de vista fisiológico, la fuerza se contempla como la capacidad de producir la tensión que posee un músculo al activarse (González Badillo & Serna, 2002). La cultura del entrenamiento de la fuerza se ha extendido notablemente en los últimos años. Cada vez son más los deportes que establecen esta capacidad como base de su preparación física, es un elemento clave en la mayoría de las fases de una readaptación deportiva y, sin duda, una cualidad fundamental durante etapas de desarrollo y vejez. Pero no ha sido fácil, la conceptualización de la fuerza ha experimentado una transformación que necesitó varias generaciones para asentarse y contar con el reconocimiento que requiere. Son muchas las falsas creencias y mitos que acompañaban al entrenamiento de fuerza, desde la idea de que las mujeres se ponen muy fuertes por entrenar con pesas o que entrenar en el gimnasio vuelve lento al deportista. Por suerte, estas ideas están quedando desfasadas, gracias al trabajo de investigación que se está llevando a cabo en el mundo de las ciencias del deporte, indagando en el potencial que ofrece trabajar la fuerza, no sólo para la mejora del rendimiento deportivo, sino para la mejora de la salud y calidad de vida, al combatir y paliar diversas patologías como la sarcopenia, diabetes, hipercolesterolemia o síndrome metabólico. Pero esto no es suficiente, la influencia de la era de internet y la divulgación no científica sobre todo en redes sociales está haciendo mucho daño. El entrenamiento de fuerza es un producto de moda y la aparición de nuevas metodologías de entrenamiento ha desencadenado una vorágine que a menudo no se sustenta sobre un respaldo científico. Algo paradójico, puesto que el entrenamiento es una ciencia y realmente es necesario profundizar en la literatura para aportar una teoría lógica de cómo se debería entrenar.

Son muchos los centros deportivos que ofertan programas de entrenamiento sin un criterio lógico en cuanto a la progresión de las cargas. Tampoco la individualización del entrenamiento o simplemente que se tenga en cuenta el efecto que se produce en una sesión, teniendo en cuenta la carga programada para el siguiente entrenamiento. Clases colectivas o modalidades como el Crossfit obvian muchos de los principios básicos del entrenamiento, con lo cuál, se abre un debate entre el marketing que envuelve estas modalidades, respaldadas por el buen ambiente de entrenamiento y la mentalidad de “no pain, no gain”, lo que se traduce en que, si no se sufre entrenando, no se mejora. Esta idea está muy ligada al entrenamiento hasta el fallo muscular, agotando todas las repeticiones posibles, donde prima la cantidad. Frente a otra corriente, algo más inusual de ver en el mercado laboral, que avala conseguir lo mejor del deportista con el mínimo esfuerzo posible, “no pain, more gain” priorizando la calidad. Esta visión del entrenamiento requiere de mucho mas conocimiento que la primera por parte de los profesionales que la dirigen, puesto que pretende aportar al deportista la mínima dosis necesaria para potenciar su mejora, manteniéndolo alejado del sobreentrenamiento y del riesgo de lesión.

Con la idea de indagar en el efecto que produce el entrenamiento de fuerza para poder actuar de acorde a esta fatiga producida, surge la motivación para realizar la siguiente tesis doctoral, aportando una visión científica a una problemática que afecta a todos los que practican entrenamiento de fuerza. Son muchas las cuestiones planteadas a diario por preparadores físicos, entrenadores o incluso deportistas, cómo: ¿cuántas repeticiones o series realizo? ¿cuánto tiempo de recuperación empleo? ¿llego hasta el fallo o no? etc. Está claro que una respuesta u otra condiciona el efecto producido, por lo tanto, la posibilidad de manejar este tipo de información hará que el entrenamiento ofrezca mayor o menor posibilidad de éxito.

Existen numerosas investigaciones en el campo de las ciencias del deporte, donde es posible encontrar gran cantidad de publicaciones relacionadas con la evaluación y el entrenamiento de fuerza. Pero es necesario ahondar aún más, ya que existe una falta de conocimiento sobre los efectos que produce la manipulación de las configuraciones del entrenamiento de esta cualidad física. Es por ello por lo que

se hace necesario investigar sobre la respuesta ante estas variaciones, aportando resultados desde una perspectiva mecánica, perceptiva, metabólica, neuromuscular e incluso bioquímica. De esta forma, se podrá facilitar a los preparadores físicos y profesionales de la Actividad Física y del Deporte, una herramienta eficaz para entender la respuesta ante diversos estímulos de entrenamiento de fuerza y que su trabajo pueda ser lo más óptimo posible, alejado de modas y corrientes que no tienen base científica, distanciadas de la realidad.

Durante esta Tesis Doctoral se han llevado a cabo los siguientes estudios científicos con el fin de dar explicación a las cuestiones planteadas anteriormente, buscando aportar respuestas ante estímulos agudos desde diferentes perspectivas. Todos ellos se han llevado a cabo con estudiantes entrenados de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, que han firmado un consentimiento informado al cumplir con los criterios de inclusión para el mismo y cumpliendo con los comités de ética pertinentes.

■ **Estudio I: Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat**

El entrenamiento de fuerza Cluster se caracteriza por establecer pequeños descansos entre repeticiones o entre grupos de ellas. Para este estudio se ha propuesto comparar el efecto metabólico, mecánico y perceptual tras diferentes protocolos de fuerza en sentadilla con el mismo número de repeticiones (30 reps) y la misma carga (con un peso que pudieran hacer 10 repeticiones) pero diferente configuración de las series. Dos de ellos fueron tradicionales, con repeticiones continuas, donde uno agotaba todas las repeticiones posibles (3 series de 10 repeticiones) y el otro realizó la mitad de las repeticiones realizables por serie (6 series de 5 repeticiones). Otros tres protocolos de Cluster de 3 series de 10 repeticiones con diferentes tiempos de recuperación entre repeticiones (10, 15 y 30 segundos). Por último, ha sido propuesto un protocolo caracterizado por realizar 30 repeticiones seguidas con un tiempo de recuperación entre repetición de 15 segundos. El objetivo fue averiguar cual de estos protocolos de entrenamiento obtenían mejor rendimiento y producían menor fatiga al estudiar la respuesta del lactato como marcador metabólico, la capacidad de salto y la velocidad de ejecución como medidas de fatiga mecánica y la de percepción subjetiva del esfuerzo OMNI como indicador de fátiga perceptual.

■ **Estudio II: Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva**

El ácido úrico es un marcador de estrés oxidativo que ha demostrado presentar una buena respuesta en saliva tras el entrenamiento de fuerza. Por lo tanto, el objetivo de este estudio ha sido evaluar el efecto de diferentes métodos de extracción de saliva y de medición de ácido úrico tras dos entrenamientos de fuerza en sentadillas con distinto nivel de esfuerzo, relacionándolo con los valores de ácido úrico en sangre como Gold Standard. Las extracciones se realizaron pre y post (60min, 24 y 48h) para sangre y saliva. Se obtuvo saliva no estimulada (por flujo pasivo) y estimulada (utilizando rollitos de algodón). Además, se evaluaron tres tipos de expresión de valores de ácido úrico en saliva corregidos por flujo salival, por proteínas totales salivares y sin corregir (en valores absolutos). Con el fin de obtener el método más preciso posible a la hora de medir la respuesta de este metabolito en saliva tras el entrenamiento de fuerza.

■ **Estudio III: Effect of different interser rest intervals on movement velocity during the squat and bench press exercises**

El tiempo de recuperación entre series durante el entrenamiento de fuerza es una de las variables que más determinan la orientación del estímulo. Por lo tanto, ante un mismo entrenamiento de sentadilla y press de banca, (3 series de 5 repeticiones con la carga que podían realizar 10 repeticiones) hemos establecido tres protocolos con diferente tiempo de recuperación: 1, 3 y 5 minutos. El efecto de estas configuraciones de la serie se ha cuantificado a partir de la velocidad de ejecución de cada repetición y la fatiga producida al comparar el perfil fuerza velocidad pre y post entrenamiento para el miembro superior e inferior.

■ **Estudio IV: Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol**

Durante un ejercicio como la sentadilla, podemos diferenciar una fase de trabajo excéntrico, en el que el sujeto realiza flexión de cadera y rodillas, descendiendo con la barra y una fase de trabajo concéntrico en donde se realiza la extensión de rodillas y cadera para volver a la posición inicial. Si se aumenta el tiempo de la fase excéntrica al frenar el recorrido, y, además, se emplea un peso mayor del que supone el 1RM, estamos ante un tipo de entrenamiento de fuerza

excéntrico acentuado. Lo que implica, una mayor demanda mecánica, además de producir un daño muscular exacerbado en comparación con un ejercicio convencional donde se prioriza el trabajo de la fase concéntrica. El objetivo de este estudio ha sido investigar la respuesta de los marcadores Creatina Kinasa (CK) y Aspartato Aminotransferasa (AST) de daño muscular en sangre y en saliva tras un protocolo de entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado con el 120% del peso de la repetición máxima (120%RM) en sentadilla, realizando 4 series de 8 repeticiones y extracciones de sangre y saliva preentrenamiento y post 24 y 96h, con el fin de comprobar la dinámica de los biomarcadores y la fiabilidad de estos dos métodos de medición.

■ **Estudio V: Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue**

La fatiga central y periférica tras el entrenamiento de fuerza nos aporta una valiosa información acerca de las demandas neurales del entrenamiento. La primera de ellas denota una incapacidad del sistema nervioso central para transportar la información hasta el músculo, mientras que la fatiga periférica ocurre como consecuencia del decremento de la capacidad contráctil de la musculatura. Esta última está asociada a un alto índice de daño muscular. Por lo que el objetivo del estudio ha sido comparar la fatiga y el daño muscular producido tras dos protocolos diferentes de fuerza en sentadilla, uno de ellos hasta el fallo (6 series de 10 repeticiones) y otro hasta el no fallo (6 series de 5 repeticiones). Estas mediciones se realizaron pre y post entrenamiento (a los 60 min, 24 y 48 horas) para comprobar como evolucionaba la fatiga a lo largo de los días posteriores. Con la intención de dar explicación del tipo de fatiga y la duración de esta, además del daño muscular producido tras estos dos entrenamientos con configuraciones de la serie diferente. Destacamos la novedad de utilizar la pérdida de velocidad entre series como indicador de fatiga mecánica.

Esta tesis doctoral se desarrolla dentro del grupo de investigación de Neurociencia y Movimiento Humano (Neuromove) de la Universidad Católica San Antonio de Murcia UCAM, bajo la tutela de los directores Dr. Pedro Jiménez Reyes, Dr. Gonzalo Márquez y la Dra. Asta Tvarijonaviciute; en colaboración con la Universidad Católica Santísima Concepción de Chile, donde se ha realizado el

último experimento de esta tesis durante la estancia internacional de tres meses y medio, supervisado por el Dr. Amador García Ramos, profesor de esta universidad. Existen tres grandes grupos en España que llevan una línea de investigación similar a las de esta tesis

El trabajo desempeñado por nuestro grupo de investigación para la presente tesis pretende dar respuesta a diversas brechas de la literatura. Con el fin de aportar nuevas herramientas que puedan contribuir a la mejora de la metodología de trabajo en el entrenamiento de fuerza, se ha intentado estudiar el efecto de las diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza desde una amplia perspectiva, algunas como la altura de salto y la velocidad de ejecución como herramienta fácil de usar y que pueden aportar feedback inmediato. Por otro lado, la respuesta a través de la escala subjetiva del esfuerzo (OMNI), nos aporta una herramienta sencilla y eficaz para controlar el efecto de la sesión de entrenamiento. La evaluación de la fatiga central y periférica permite una comprensión neuromuscular del mecanismo de fatiga, lo que nos aporta una información muy valiosa y útil. La relación fuerza-velocidad nos aporta una visión acerca del comportamiento del rendimiento ante diferentes cargas y, por consiguiente, la capacidad del deportista para aplicar fuerza o velocidad. Para finalizar, el perfil bioquímico completa este abanico de pruebas, siendo un reflejo de la respuesta del organismo a nivel de daño muscular, inflamación y estrés oxidativo. Sin duda, diferentes métodos con un mismo fin, llegar a una concepción de fatiga que nos ayude a cuantificar la carga y la recuperación que necesita el deportista tras una sesión de entrenamiento de fuerza para programar el resto de las sesiones.

II

**Origen de la problemática
objeto de estudio**

II/ ORIGEN DE LA PROBLEMÁTICA OBJETO DE ESTUDIO

Son muchos los artículos científicos y los libros en donde se postula al trabajo de fuerza como un pilar fundamental en el entrenamiento. *“En el deporte únicamente se pueden realizar dos cosas: pensar y aplicar fuerza”*. Esta frase mencionada por el Prof. González Badillo en una conferencia refleja la importancia de la fuerza en el entrenamiento. Es por ello, que trabajar esta cualidad incumbe a entrenadores, preparadores y educadores físicos, fisioterapeutas e incluso médicos. Se ha demostrado que el entrenamiento de fuerza es una herramienta eficaz no sólo para la mejora del rendimiento en la mayoría de los deportes, sino también para la mejora de la salud y calidad de vida de nuestra sociedad (Ratamess et al., 2009). En relación al rendimiento, se pueden apreciar acciones comunes durante numerosos deportes, como el esprint, saltos o los lanzamientos, pudiéndose mejorar a través del entrenamiento de fuerza (Cronin & Sleivert, 2005; Freitas, Martinez Rodriguez, Calleja González, & Alcaraz, 2017; García Ramos, Haff, Feriche, & Jaric, 2017). Además, en la mayoría de las lesiones deportivas, el entrenamiento de fuerza es protagonista durante las distintas fases de readaptación, siendo los niveles de fuerza un valor muy utilizado para conocer el progreso del lesionado (Mendiguchia et al., 2016). Por otro lado, desde el punto de vista de la salud, existe gran cantidad de enfermedades o trastornos que pueden ser tratados a través del entrenamiento de fuerza. Se ha demostrado que patologías como la sarcopenia, problemas posturales, enfermedades cardiovasculares, osteoporosis, diabetes etc. experimentan en muchos casos una notable mejoría al emplear el entrenamiento de fuerza frente al ser tratadas únicamente mediante fármacos (Brooks et al., 2007; Hurley, Hanson & Sheaff K., 2011; Roth, Ferrell, & Hurley, 2000; Schjerve et al., 2008). Es por ello por lo que el conocimiento de esta cualidad y del diseño del entrenamiento presenta gran importancia.

Es necesario conocer el efecto que producirá el estímulo que se pretende inducir, puesto que el sistema neuromuscular se adapta al estímulo al que se ve sometido con regularidad (Coffey & Hawley, 2007). Por lo tanto, las adaptaciones fisiológicas, mecánicas e, incluso, morfológica dependerán de la configuración de

las series resultante al combinar las variables de volumen, intensidad, descanso, tipo y orden de ejercicios, velocidad de ejecución, tiempo bajo tensión o el carácter del esfuerzo (González Badillo, Rodríguez Rosell, Sánchez Medina, Gorostiaga, & Pareja Blanco, 2014; Pareja Blanco et al., 2016; Pareja Blanco, Rodríguez Rosell, & González Badillo, 2014). Pero la configuración de estas variables no tiene sentido si no se conoce el estado del deportista. Es por ello, que existe la necesidad de realizar alguna evaluación previa para planificar el programa de entrenamiento en función de los valores obtenidos en esta.

A la hora de evaluar y diseñar los entrenamientos de fuerza, la referencia más usada comúnmente ha sido la Repetición Máxima (RM). Este valor se entiende como la carga con la que el sujeto es capaz de realizar únicamente una repetición en un ejercicio determinado. A partir de este punto de referencia se pueden pautar intensidades relativas de entrenamiento estipulando la carga en función del grado de esfuerzo al que se quiera entrenar, por ejemplo, entrenar al 75% del 1RM. Sin embargo, este método de evaluación de la fuerza, a pesar de ser el más común por su carácter práctico, presenta grandes inconvenientes. Esto se debe a que la RM se estima de forma directa realizando una prueba incremental de cargas hasta conocer los kilos que el deportista puede desplazar sólo una vez en ese ejercicio en concreto. Pero la realización de estos protocolos conlleva un esfuerzo muy exigente para el cual no todas las personas están preparadas, afectando a su integridad física al exponerse a un alto riesgo de lesión, viéndose comprometida la técnica de ejecución. Además, la evaluación de la RM interfiere en la programación del entrenamiento, ya que genera un alto grado de fatiga. Por otro lado, la exigencia de este test, al requerir un esfuerzo máximo, hace que únicamente los sujetos realmente concentrados y suficientemente familiarizados en entrenamientos con cargas altas puedan aportar resultados precisos. Al depender de la voluntariedad del sujeto, aquellos deportistas no acostumbrados llegarán al fallo antes y aportarán valores subestimados de la RM, comprometiendo de esta forma la fiabilidad de la prueba. Por último, se sabe que el valor de la RM puede variar en pocas sesiones o incluso durante una misma sesión, no sólo debido a las adaptaciones del entrenamiento sino a la predisposición motivacional del sujeto (Balsalobre Fernández & Jimenez Reyes, 2014). Como supuesto práctico, podemos proponer el caso de un deportista que realiza una prueba de 1RM en sentadilla y consigue llegar a 150kg, para

posteriormente plantear dos sesiones semanales de entrenamiento durante seis semanas con un 75% del valor de esa RM. Lo más probable es que las adaptaciones al entrenamiento consigan que el peso que representaba su 75% de la RM el día de la prueba no coincida con el mismo con el entrene las últimas semanas, sino que sea menor, ya que va mejorando. Como alternativa, se podría pensar que la subsanación de este inconveniente se puede solucionar realizando test de 1RM más consecutivos, pero la exposición del deportista a este esfuerzo puede interferir con el programa de entrenamiento debido a la exigencia de la prueba, además de exhibir al deportista a un gran riesgo de lesión.

El test del XRM surge como una opción popular para “evitar” la exigencia del test de 1RM. En esta prueba se busca estimar la carga con la que se puede hacer un número submáximo de repeticiones y a partir de aquí, mediante una fórmula propuesta en el año 1993 por Matt Brzycki, (Brzycki, 1993) es posible determinar el valor de la RM.

$$RM = c / (1.0278 - (n * 0.0278))$$

Fórmula 1. Brzycki estimación del 1 RM

Donde “c” es el valor de la carga y “n” es el número de repeticiones realizadas. En este caso supongamos que se realizan 3 repeticiones con una carga de 100kg. Al resolver esta ecuación nos propone una carga estimada del RM de 105kg.

$$RM = 100 / (1.0278 - (3 * 0.0278)) = 105 \text{kg}$$

Fórmula 2. Brzycki estimación del 1 RM con datos.

Pero esta alternativa no se aleja de la problemática presentada por el test de 1RM, puesto que la exigencia es muy alta para el deportista y predomina el riesgo de lesión, ya que la última repetición se ejecuta tan lenta y con la misma fatiga o, incluso, más que la alcanzada durante el test de 1RM.

Debido a la ineficacia de los dos métodos planteados anteriormente, surge la necesidad de utilizar algún otro indicador más preciso para expresar el grado de intensidad sin necesidad de realizar levantamientos máximos. Esto se ha conseguido gracias a la medición de la velocidad de ejecución durante los ejercicios de fuerza. Esta variable ha sido mostrada como el mejor indicador del grado de intensidad en el entrenamiento de fuerza, puesto que cada porcentaje de la RM presenta un valor de velocidad de ejecución asociado (González Badillo & Sanchez Medina, 2010). Por lo tanto, mientras medimos la velocidad, siempre y cuando la intención en cada repetición sea realizar la fase concéntrica lo más rápido posible, podremos conocer el valor de la RM estimada, sin necesidad de realizar esfuerzos tan grandes ni interferir en el programa de entrenamiento. De esta forma, podremos cuantificar las ganancias de fuerza conseguidas y la efectividad de desplazar cargas submáximas a gran velocidad en cualquier momento. Por consiguiente, si se tiene en cuenta la pérdida de velocidad de ejecución durante la serie o el entrenamiento se puede conocer la fatiga inducida por el mismo. Esto es debido a que existe una relación entre el descenso de velocidad de ejecución con la acumulación de diferentes metabolitos indicadores de fatiga (Sánchez Medina & González Badillo, 2011).

Gracias a la velocidad de ejecución, podemos conocer a tiempo real la magnitud del esfuerzo inducido por el entrenamiento sobre el deportista. La velocidad de ejecución decaerá a medida que se realizan repeticiones hasta llegar al fallo. Es entonces cuando la velocidad de esta última repetición coincide con la velocidad de 1RM (ej. en sentadilla es a $\pm 0,35\text{m/s}$). Existe en la literatura un gran dilema entre entrenar al fallo o no al fallo. Algunos estudios (Drinkwater et al., 2005; Schoenfeld, 2010b) apoyan este método de entrenamiento para conseguir mejoras de fuerza, potencia e hipertrofia, mientras que nuevas investigaciones han demostrado que no es necesario llegar hasta el fallo para conseguir las mismas o, incluso, mejores valores de fuerza, hipertrofia o potencia (Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; Izquierdo, Ibañez, González Badillo, et al 2006; Nóbrega & Libardi, 2016) . Entrenar hasta el fallo produce una gran pérdida de velocidad de ejecución, y se aumenta el tiempo bajo tensión, lo que activa en mayor medida las fibras lentas. Es aquí donde se produce una controversia con la mayoría de los deportes en los que interesa desplazar cargas a velocidades altas, siendo

necesario entrenar a través de configuraciones de la serie en las que no se agoten todas las repeticiones posibles, permitiendo desplazar la barra a altas velocidades y con breves tiempos bajo tensión. A la hora de prescribir estos entrenamientos, toma protagonismo el “carácter del esfuerzo”. Este concepto se entiende como la relación entre las repeticiones realizadas en función de las realizables (Gonzalez Badillo et al., 2016) . Un ejemplo de entrenamiento hasta el fallo es 3x10(10) donde se realizan tres series de diez repeticiones con un peso que se podrían completar diez repeticiones. Frente a 3x5(10) donde se realizan la mitad de las repeticiones posible por cada serie.

Además de estas variables que afectan a la configuración de la serie, el implantar periodos breves de recuperación entre repeticiones, en torno a 20-40 segundos, es una herramienta que ha tomado mucho protagonismo en el entrenamiento de fuerza durante la última década. Esta estrategia se conoce como entrenamiento Cluster y se basa en la idea de permitir la resíntesis del ATP durante estos breves periodos de descanso entre repeticiones, y, por consiguiente, mejorar el rendimiento durante el entrenamiento (Haff et al., 2008). Esta propuesta de configuración de las series, permite entrenar con una menor pérdida fatiga mecánica y metabólica (García Ramos et al., 2020), además de una menor percepción del esfuerzo (Mayo, Iglesias Soler, & Fernández Del Olmo, 2014) y una mejor prevalencia de la técnica de ejecución (Hardee, Lawrence, Zwetsloot, et al., 2012) que el entrenamiento tradicional que aboga por realizar repeticiones continuas.

La modificación de las variables que configuran el entrenamiento de fuerza condicionará los estímulos inducidos y por lo tanto las adaptaciones conseguidas. Por esta razón surge la necesidad de estudiar la respuesta de diferentes configuraciones de la serie desde una amplia perspectiva, teniendo en cuenta factores mecánicos, metabólicos, perceptivos, bioquímicos y neurológicos.

III

**Estado actual del
conocimiento**

III/ ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

3.1. EL ENTRENAMIENTO DEPORTIVO Y LA FUERZA: EL ROL DE LA FUERZA EN LAS NUEVAS TENDENCIAS DE ENTRENAMIENTO

El entrenamiento de fuerza ha demostrado ser una solución a muchos problemas en la rehabilitación de deportistas, ya el Dr. Delorme durante la II Guerra Mundial utilizaba el trabajo de fuerza con sobrecargas pesadas para recuperar las lesiones producidas en los heridos de guerra (Delorme, 1945). El primer entrenamiento propuesto se basaba en 7 series de 10 repeticiones con cargas altas durante 5 días a la semana. Posteriormente en la publicación de (DeLorme & Watkins, 1948) este mismo médico planteó reducir el número de series a 3 y realizar cada una con un incremento progresivo de la carga utilizada, obteniendo mejores resultados. El éxito en sus intervenciones y los resultados de numerosas y recientes investigaciones han consagrado al entrenamiento de fuerza como un pilar básico para las diferentes fases de la readaptación de lesiones (Todd, Shurley, & Todd, 2012). Además, el entrenamiento de fuerza es considerado como la base de la preparación física en la mayoría de los deportes (Ratamess et al., 2009). Son muchas las perspectivas de entrenamiento y las concepciones que se tienen en cuanto al desarrollo y el planteamiento de esta cualidad. Ya sea en base a la idiosincrasia del deporte, de la disposición en cuanto a tiempo o materiales, pero siempre teniendo la fuerza como factor común en todas ellas. Existe una concepción social como herencia de míticas investigaciones (Berger, 1962a, 1962b; DeLorme, Schwab, & Watkins, 1948; DeLorme & Watkins, 1948) donde se ha instaurado comúnmente el entrenamiento de fuerza a través de 3 series de 10 repeticiones. Esta es la configuración típica mediante la cual se ha estudiado diversos efectos (Berger, 1962a; Calle & Fernandez, 2010; Hakkinen, Pakarinen, Alen, Kauhanen, & Komi, 1988) y adaptaciones (Izquierdo, Ibañez, González Badillo et al., 2006; Marshall, McEwen, & Robbins, 2011; Sanborn et al., 2000). A partir de aquí, se ha visto que el trabajo con menos repeticiones y cargas más cercanas al RM pueden proporcionar mayores ventajas a la hora de incrementar los niveles de fuerza (González Badillo, Gorostiaga, Arellano, & Izquierdo, 2005). Mientras que trabajar con cargas cercanas

a 10RM es un recurso muy implementado cuando la intención es mejorar los niveles de hipertrofia (Schoenfeld, 2016). Por otro lado, para la mejora de la Potencia, se ha propuesto trabajar con cargas más ligeras, entorno a 6 repeticiones con un peso que se puedan completar 10-12 repeticiones (Pareja Blanco et al., 2016). Finalmente, el uso de cargas con las que se puedan realizar entre 15-20 repeticiones suele estar orientado al trabajo de resistencia a la fuerza o periodos básicos de entrenamiento (Manolopoulos, Papadopoulos, Salonikidis, Katartzi, & Poluha, 2004; Ratamess et al., 2009). Numerosas investigaciones son las que han estudiado las adaptaciones producidas, ya sea midiendo niveles de fuerza o potencia (Newton et al., 2002; Soriano, Jiménez Reyes, Rhea, & Marín, 2015; Tan, 1999). La medición de la sección transversal del músculo es usada para conocer los niveles de hipertrofia (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Häkkinen, 2003) y el rendimiento en otras pruebas como la altura de salto o el tiempo en un sprint, son comúnmente pautadas para medir la eficacia de diversos programas de entrenamiento (Pareja Blanco et al., 2016).

Nos hemos percatado de que el estudio de los efectos agudos producidos por el entrenamiento de fuerza tiene mayor protagonismo en la literatura científica. Son muchos los trabajos que abordan esta problemática desde una perspectiva mecánica, ya sea a través de la velocidad de ejecución (García Ramos et al., 2018; González Badillo & Sanchez Medina, 2010; Pérez Castilla, García Ramos, Padial, Morales Artacho, & Feriche, 2018; Rodríguez Rosell et al., 2020), o la pérdida de altura de salto vertical (Claudino et al., 2017; Pérez Castilla, García Ramos, et al., 2018; Rodríguez Rosell et al., 2020). También podemos encontrar investigaciones que han explorado las consecuencias del entrenamiento de fuerza desde un punto de vista metabólico, analizando metabolitos como el Lactato o el Amonio (Gorostiaga et al., 2014; Pareja Blanco et al., 2014; Rodríguez Rosell et al., 2018; Sánchez Medina, González Badillo, Pérez, & Pallarés, 2014), diferentes biomarcadores de daño muscular como la Creatina Kinasa (Brancaccio, Limongelli, & Maffulli, 2006; Clarkson & Hubal, 2002; González Badillo, Marques, & Sánchez Medina, 2011; Gonzalez Badillo et al., 2016; Koch, Pereira, & Machado, 2014; Pareja Blanco et al., 2016) u hormonas como la Testosterona (Hayes, Bickerstaff, & Baker, 2010; Izquierdo et al., 2009; Kraemer et al., 2001). Del mismo modo, la percepción subjetiva del esfuerzo ha demostrado tener un gran protagonismo a la hora de cuantificar el esfuerzo ocasionado durante

el entrenamiento de fuerza (Naclerio et al., 2011; Robertson et al., 2003), siendo de gran utilidad por la simplicidad de su medición. La medición de la relación fuerza-velocidad ante diferentes cargas, nos aporta una visión de la capacidad del deportista para conseguir desplazar la carga a través de la capacidad de aplicar mayores niveles de fuerza o velocidad (García Ramos, Suzovic, & Pérez Castilla, 2019). Por último, el estudio de la fatiga central y periférica aporta una visión más completa acerca de la implicación del sistema nervioso durante el entrenamiento de esta cualidad (Carroll, Taylor, & Gandevia, 2016; Gandevia, 2001; Marquez et al., 2016). En definitiva, la mayoría de estas investigaciones buscan entender los efectos producidos con el fin de aportar herramientas que optimicen el entrenamiento de fuerza y su recuperación.

Es importante tener en cuenta que la planificación, la organización de los ejercicios, la orientación, cargas, tiempos de descanso, repeticiones etc. van a depender del objetivo del entrenamiento, de la idiosincrasia del deporte y de las cualidades del deportista. Todas las variables que engloban o caracterizan el entrenamiento de fuerza van a condicionar los efectos y las adaptaciones conseguidas (Coffey & Hawley, 2007). Es por ello por lo que se hace necesario gestionar todas estas variables posibles para obtener el mejor rendimiento del deportista a través de la mejora de la capacidad de aplicar fuerza en condiciones similares al tiempo disponible de aplicar fuerza durante el gesto deportivo. Es aquí donde asume mayor protagonismo la producción de fuerza por unidad de tiempo, o como se conoce en la literatura "Rate of Force Development (RFD)" (Aagaard, Simonsen, Andersen, Magnusson, & Dyhre Poulsen, 2002; Maffiuletti et al., 2016). La capacidad de aplicar la mayor fuerza posible en el menor tiempo disponible maximizará el rendimiento deportivo al adecuarse a las demandas de la competición (Gruber & Gollhofer, 2004; McLellan, Lovell, & Gass, 2011). Existen casos directos en la transferencia de las ganancias de fuerza para algunas pruebas del atletismo como saltos y lanzamientos (Weese, Hornsby, Stone, & Stone, 2015; Zaras et al., 2014) o de forma indirecta, puesto que se ha demostrado que a través del trabajo de fuerza se puede mejorar la economía de carrera en corredores, traducándose en la mejora del rendimiento (Paavolainen, Häkkinen, Hämmäläinen, Nummela, & Rusko, 1999). Por otro lado, en deportes colectivos, numerosos estudios relacionan ganancias en niveles de fuerza con mejora del sprint y COD (Christou et al., 2006;

De Hoyo et al., 2016; Loturco et al., 2015; Rodríguez Rosell et al., 2016) y mejoras de la velocidad del balón al ser golpeado a través del entrenamiento de fuerza (Rodríguez Lorenzo, Fernandez Del Olmo, Sanchez Molina, & Acero, 2016).

En los entrenamientos individuales, como el atletismo, comunmente ha estado muy instaurado el entrenamiento con “hierro”, utilizando muchos ejercicios provenientes de la halterofilia, donde prima la carga en el eje axial y basándose en el RM para determinar las cargas de entrenamiento o en entrenadores más actualizados, midiendo la velocidad de ejecución. El grupo de investigación de González Badillo ha sido protagonista a la hora de acercar a los entrenadores las evidencias científicas que respaldan el beneficio de la medición de la velocidad de movimiento en el entrenamiento de fuerza para la mejora del rendimiento. Por otro lado, para los deportes de equipo se ha consagrado una contextualización de fuerza diferente, una línea impulsada por preparadores físicos como Paco Seirullo, Julio Tous u Oliver Gonzalo Skok. Esta se caracteriza por el uso de diferentes materiales, la similitud del ejercicio de fuerza con el gesto deportivo, el trabajo a través de la diversificación de vectores, gomas elásticas, máquinas isoinerciales, y acciones específicas del juego (Gonzalo Skok, Sánchez Sabaté, Izquierdo Lupón, & Sáez de Villarreal, 2019; Norrbrand, Tous Fajardo, Vargas, & Tesch, 2011; Tous Fajardo, Gonzalo Skok, Arjol Serrano, & Tesch, 2016). Aunque estas propuestas metodológicas difieran en cuanto a los métodos de trabajo, el objetivo es el mismo, utilizar el trabajo de fuerza como medio para obtener el máximo rendimiento del deportista y que no se lesione.

Las lesiones son la causa principal por la que un deportista experimenta un descenso de su rendimiento (Gabbett, 2016). Éstas no sólo repercuten de forma directa sobre el atleta o el jugador, si no que se traduce en pérdidas económicas tanto para ellos mismo como al club al que pertenecen (Bourne et al., 2018). Muchas lesiones suelen ocasionarse por déficits o desbalances de fuerza (Brughelli, Cronin, Mendiguchia, Kinsella, & Nosaka, 2010). Son muchas las inquietudes de los preparadores físicos en cuanto a la prevención de lesiones, Fagenbaum & Myer (2010) reportan en su revisión que el entrenamiento de fuerza es una herramienta eficaz para proteger a jóvenes futbolistas de las lesiones. Desde un punto de vista práctico, Silvers et al. (2017) han demostrado que el FIFA 11+; un protocolo de

prevención de lesiones basado en el entrenamiento de la fuerza de la musculatura que envuelve la rodilla y el abdomen, es un programa eficaz para la prevención de lesiones de Ligamento Cruzado Anterior en futbolistas. Por otro lado, Medniguchia et al. (2017) ha propuesto un algoritmo individualizado de entrenamiento de fuerza en función de los periodos de evolución del deportista para la readaptación de rotura de isquiritales. Por lo tanto, las ganancias de fuerza asociadas al programa de readaptación se considera un valor válido para medir la progresión del deportista (Brughelli et al., 2010).

3.2. FACTORES DETERMINANTES DE LA FUERZA

Es importante comprender el mecanismo de contracción muscular para el entendimiento de los factores determinantes de la fuerza. Las dos únicas acciones que puede desempeñar un músculo son contraerse e inhibirse (Nielsen & Kagamihara, 1992). Estas acciones se ven impulsadas por una señal eléctrica, que condicionan la activación de las fibras musculares. A la hora de contraerse, las fibras se acortan, mediante los puentes establecidos entre las proteínas de actina y miosina, como explica la teoría de deslizamiento (Huxley & Niedergerke, 1954). Esta acción da lugar a una tensión muscular que desencadena la aplicación de la fuerza. Durante la relajación, estos puentes de actina y miosina vuelven a separarse. Este mecanismo requiere de un coste energético, el cual hay que suplir. Es por ello por lo que un decremento en la aplicación de fuerza se relaciona con la fatiga al haberse depleccionado los diferentes sustratos energéticos requeridos.

La producción y aplicación de fuerza se verá condicionada en gran medida por diferentes factores. Dejando a un lado los factores psicológicos, que dependen de la mentalidad del deportista y los factores metabólicos y hormonales, que se ven comprometidos por el estado de fatiga, podemos entender que los factores mecánicos y neurológicos son los más interesantes desde el punto de vista del entrenador. Por lo tanto, el entendimiento de la implicación y determinación de estos factores puede ser una herramienta interesante para conseguir beneficios durante el entrenamiento o para entender diferentes procesos de fatiga y recuperación.

3.2.1. Factores mecánicos/ estructurales

3.2.1.1. Área de Sección Transversal del Músculo.

Por factores mecánicos entendemos aquellos aspectos derivados de la arquitectura muscular que influyen en la producción de fuerza. El área de sección transversal del músculo o cómo se conoce en la literatura Cross Sectional Area (CSA) es quizás, el factor más determinante de la fuerza. Se refiere al tamaño del músculo o como se conoce en la literatura científica, a la hipertrofia muscular. Esta se mide a través de ecografía. Muchos estudios han encontrado una relación lineal entre la fuerza dinámica máxima y el CSA (Alway, Grumbt, Stray Gundersen, & Gonyea, 1992; Schoenfeld, Peterson, Ogborn, Contreras, & Sonmez, 2015). Basándose en la teoría de que un aumento del número de los puentes cruzados de actina y miosina producen una mejora en la aplicación de la fuerza, al verse incrementando el tamaño y el número de miofibrillas y por consiguiente, el número de sarcómeros (Folland & Williams, 2007; Goldspink et al., 1992; Suchomel, Nimphius, Bellon, & Stone, 2018). Además, la disposición en paralelo de las fibras optimiza la producción de fuerza por parte del músculo (Roger M. Enoka, 2002), siendo esta proporcional al número de sarcómeros en paralelo activados.

Para el aumento del CSA, se ha trabajado tradicionalmente con repeticiones cercanas al fallo, cargas medias y altas (Grgic et al., 2018b; Schoenfeld, 2016), altos volúmenes de repeticiones (Schoenfeld, Ogborn, Vigotsky, Franchi, & Krieger, 2017) y tiempo bajo tensión (TUT) (Rathleff, Thorborg, & Bandholm, 2013), a la vez de tiempos de recuperación cortos (Schoenfeld, 2010b). El fin de esta estrategia es aumentar el estrés metabólico, produciendo excesivo daño muscular para inducir un proceso de resíntesis proteica que desencadene el proceso de hipertrofia muscular (Schoenfeld, 2016).

El CSA se puede ver afectada a través de diferentes procesos de entrenamiento, por el cese de la actividad deportiva o por la edad (Melnik, Rogers, & Hurley, 2009; Narici, Roi, Landoni, Minetti, & Cerretelli, 1989). El CSA aumenta durante el desarrollo hasta estabilizarse llegado los 20 años. Si no se realiza entrenamiento de fuerza que mantenga las propiedades mecánicas de la musculatura, a partir de los

50 años es normal entrar en un proceso de sarcopenia, donde se irá perdiendo masa muscular, atrofiándose y reduciéndose el número de fibras y por consiguiente, experimentando un decremento en los niveles de fuerza (Harridge et al., 1996). Es por ello por lo que el entrenamiento de fuerza es necesario incluso para los mayores.

3.2.1.2. *Ángulo de Penneación*

El ángulo de penneación hace referencia a la disposición de las fibras dentro de un músculo. Si las fibras musculares se disponen paralelas al eje longitudinal del músculo, nos encontramos antes un músculo fusiforme (ejemplo: el Bíceps), mientras que, si se conforman según un ángulo de inserción a la aponeurosis, estaremos hablando de músculos peniformes (ejemplo: el Deltoides). Este ángulo es un determinante en la producción de fuerza. Un aumento de AST producirá un incremento del ángulo de penneación. Esto se debe al tener más miofibras agrupadas en paralelo y además de mayor cantidad de puentes de actina y miosina disponible para la contracción muscular y, por consiguiente, mejoras en la producción de fuerza. Mientras que por el contrario, un ángulo de penneación más pequeño consigue mayor velocidad de contracción (Folland & Williams, 2007). Durante una contracción muscular el ángulo de penneación se ve modificado, aumentando este ángulo en las fases más próximas a máximo acortamiento (Maganaris, Baltzopoulos, & Sargeant, 1998).

A través del entrenamiento de fuerza se puede modificar el ángulo de penneación. Es complicado que se realice de forma homogénea dentro de un mismo músculo ya que dependerá del tipo de ejercicio realizado, el rango en el que se acentúe la fuerza, el tipo de contracción etc. (Ichinose, Kanehisa, Ito, Kawakami, & Fukunaga, 1998). Los investigadores Aagaard et al. (2001) reportaron incrementos en el ángulo de penneación debido a un aumento del grosor de los fascículos como consecuencia del entrenamiento de fuerza con cargas altas mientras que las mejoras en cuanto a la longitud del fascículo se relacionan con una mejora de la aplicación de fuerza, debido al aumento de la velocidad de contracción muscular (Nimphius, McGuigan, & Newton, 2012).

3.2.1.3. Tipos de fibras

Existen diferentes tipos de fibras musculares, y su distribución porcentual en la musculatura está determinado genéticamente y como consecuencia del entrenamiento. Actualmente la clasificación de las fibras musculares se realiza en función del tipo de miosina presente en la célula y de la velocidad de acortamiento de la fibra (Schiaffino & Reggiani, 1996). En humanos podemos encontrar fibras de contracción lenta (I), intermedia (IIa) y rápida (IIb). Las fibras lentas son de menor tamaño que las rápidas, además poseen una gran capacidad oxidativa debido al gran número de mitocondrias que presentan, lo que se relaciona con una predominancia en la musculatura de atletas de resistencia (entre un 60-70% de la cantidad de fibras totales) (Mazzetti, Yocum, & Harber, 2007; Scott, Stevens, & Binder Macleod, 2001). Por otro lado, las fibras tipo II o rápidas predominan en musculatura de deportistas que orientan su entrenamiento a las necesidades de la fosfocreatina y de acciones explosivas como halterófilos o velocistas (Chicharro & Mojares, 2008). A partir del estímulo al que se someta la musculatura se va a condicionar el tipo de fibra dominante en cada grupo muscular. Se ha comprobado que el tipo de fibra varía en función del entrenamiento al que se ha sometido a un deportista. Realizar ejercicios de fuerza con cargas cercanas al fallo muscular o cargas bajas (Ikegawa et al., 2008) activarán y estimularán en mayor medida fibras lentas. Mientras que al predominar velocidades de contracción altas y cargas elevadas, se demandará la activación de fibras tipo II (Chicharro & Mojares, 2008).

3.2.2. Factores neurológicos

Por último, desde un punto de vista Neural, debemos tener en cuenta los factores neurológicos como condicionantes de la aplicación de fuerza. Sobre todo, en las primeras fases de entrenamiento, donde la mejora de la fuerza no se consigue mediante el aumento del AST del músculo, sino por una mejora del impulso nervioso desde el sistema nervioso central (SNC) a las fibras musculares (González Badillo & Serna, 2002).

3.2.2.1. *Reclutamientos de unidades motoras*

Las unidades motoras se componen por una motoneurona alfa y las fibras musculares a las que inervan (Chicharro & Mojares, 2008). Es común que una motoneurona inerve a cientos de fibras musculares. Esto se traduce en que un mayor número de unidades motoras reclutadas generará una mayor producción de fuerza (Suchomel et al., 2018). El tipo de actividad va a determinar las fibras que se activen. Aquí toma protagonismo el concepto de principio de tamaño, propuesto por Henneman en el año (1957), basándose en que, durante un ejercicio, las fibras musculares respetan un orden jerárquico de contracción. De esta forma, se explica que frente a una actividad donde se requiere de poca fuerza, se reclutarán primero las fibras musculares de tipo I (bajo umbral excitatorio) ya que son suficientemente efectivas para estas demandas. A medida que aumenta la demanda de fuerza se van reclutando mayor porcentaje de fibras tipo I y tipo II (mayor umbral excitatorio). Este principio del tamaño no siempre se cumple, existen acciones balísticas, explosivas que demandan un reclutamiento temprano de fibras tipo II y a medida que fuera apareciendo la fatiga, se reclutarían más fibras de tipo I para soportar la actividad en cuestión, pero está claro que a velocidades más lenta. Es un ejemplo de lo que sucede con el entrenamiento de fuerza hasta el fallo, donde al entrenar con cargas altas e intención de desplazar la carga a máxima velocidad se empezarán reclutando motoneuronas de mayor tamaño y fibras rápidas y la pérdida de velocidad, relacionada con la aparición de la fatiga, ocasionará la activación de fibras tipo I (Macgregor & Hunter, 2018; Pareja Blanco et al., 2016).

3.2.2.2. *Frecuencia de Estímulo*

Por frecuencia de estímulo se entiende la velocidad a la que la motoneurona manda información de contracción al músculo (Suchomel et al., 2018). Conseguir que la información llegue antes a la musculatura mejorará el rendimiento, no sólo en cuanto a niveles de fuerza, (Gabriel, Kamen, & Frost, 2006) sino también a la posibilidad de alcanzar en menos tiempo el máximo nivel de fuerza, o lo que es lo mismo, la RFD (Gruber & Gollhofer, 2004). Este factor neural se puede mejorar con el trabajo de ejercicios pliométricos (Van Cutsem, Duchateau, & Hainaut, 1998) o levantamientos olímpicos (Leong, Kamen, Patten, & Burke, 1999) ya que buscan

contracciones musculares a altas velocidades. Gracias a la electromiografía se puede estudiar la mejora de las adaptaciones neurales al trabajo de fuerza (Balshaw, Massey, Maden Wilkinson, Tillin, & Folland, 2016), además se ha demostrado que los sujetos entrenados en fuerza presenta reclutamiento de unidades motoras con mayor velocidad de conducción que sujetos no entrenados en fuerza (Del Vecchio et al., 2018). Por ello no es sólo interesante saber que el entrenamiento mejora la frecuencia del estímulo, sino que, además, un reciente estudio de A. Del Vecchio et al. (2019) demostró que las mejoras de los niveles de fuerza en la dorsiflexión de tobillo tras 4 semanas de entrenamiento isométrico, es el resultado de un aumento de la frecuencia de estímulo. Por lo tanto, se establece a la frecuencia de estímulo como un factor altamente relacionado con la capacidad de aplicar fuerza.

3.3. VARIABLES DETERMINANTES DE LA CONFIGURACIÓN DE LAS SERIES EN EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA.

El organismo se adapta a los estímulos a los que se ve sometido, por lo tanto, el diseño de la configuración del entrenamiento de fuerza a través de diferentes variables como volumen, intensidad, frecuencia, tiempo de recuperación etc, van a condicionar la orientación del entrenamiento. Es necesario conocer los efectos desencadenantes de modificación de cada variable para poder enfocar el entrenamiento ante un objetivo y evitar el sobreentrenamiento, las lesiones y posibles adaptaciones no deseadas.

No es lo mismo realizar un entrenamiento de fuerza en sentadilla de 3 series de 10 repeticiones con un peso que pudiese realizar 12 repeticiones y recuperando 3 min entre series que realizar 3 series de 5 repeticiones con un peso que pudiese realizar 10 repeticiones y recuperando 5 minutos. El objetivo de cada uno de estos dos entrenamientos diferentes, y aunque ambos sean entrenamientos de fuerza, uno de ellos va a estar más indicado para desarrollar hipertrofia, mientras que otro está más orientado a las mejoras de los niveles de potencia.

3.3.1. Volumen

El volumen hace referencia a la cantidad total del trabajo realizado. Se puede

cuantificar por sesiones, semanalmente o durante un periodo más largo incluso. Ofrece diferentes posibilidades a la hora de modificar este estímulo, ya sea variando la cantidad de ejercicios por sesión, el número de series realizadas por ejercicios o el número de repeticiones por serie. Variar estas pautas nos permitirá orientar nuestro entrenamiento hacia un estímulo u otro. Parece ser que existe una relación de “U” invertida entre volumen de entrenamiento y rendimiento deportivo. No se sabe cuál es la dosis exacta de volumen, está claro que depende de diversos factores como el deportista y su entorno, la disciplina, el descanso etc. Pero se ha podido comprobar que entrenamientos con volúmenes moderados puede producir mejoras de rendimiento frente a sesiones con altos volúmenes, cercano a capacidad máxima del deportista, donde incluso se ha podido observar un descenso del rendimiento (González Badillo et al., 2005).

Se ha demostrado que variar el volumen puede afectar a las respuestas neurales (Hakkinen et al., 1988; Izquierdo et al., 2011), hipertróficas (Pareja Blanco et al., 2016; Schoenfeld, 2010b), metabólicas (González Badillo et al., 2005; Gorostiaga et al., 2014) y hormonales (Navarro et al., 2017; Tan, 1999) y por consiguiente, a las adaptaciones producidas. Según la literatura científica, se consideran altos volúmenes de entrenamiento cuando se realizan entre seis y ocho ejercicios (Kraemer & Ratamess, 2004). Este número de ejercicios, acompañado de repeticiones entre 8-12 con cargas medias-altas, ha demostrado ser un método más eficiente para la mejora de la hipertrofia que el trabajo con pocos ejercicios y pocas series (Baz Valle, Fontes Villalba, Santos Concejero, Maela, & Fontes Villalba, 2018; Rhea, Alvar, Burkett, & Ball, 2003). Por el contrario, utilizar bajos volúmenes con cargas altas está más orientado para la ganancia de fuerza (Ratamess et al., 2009)

Se debe hacer una distinción en cuanto al nivel del deportista para poder transcribir un volumen de entrenamiento a medida de su experiencia. Diversas investigaciones han estudiado el efecto al realizar entre dos y más de seis series y todas ellas han encontrado diferencias significativas entre sujetos entrenados y no entrenados en cuanto a las ganancias de fuerza. Los sujetos poco entrenados consiguen mejoras con menos estímulo (Berger, 1962b; Dudley & Djamil, 1985; Hortobágyi et al., 1996; Sale, Jacobs, Macdougall, & Garner, 1990), siendo tres el número óptimo de series para la ganancia de fuerza en ambos grupos (Berger,

1962a). En sujetos no entrenados se ha podido demostrar que, con únicamente una serie, se consiguen mejoras de fuerza, mientras que, en sujetos entrenados, es necesario realizar entre tres y seis series (Kraemer & Ratamess, 2004). Por lo tanto, una pauta común para la ganancia de fuerza e hipertrofia ha sido realizar entre 1-3 series, efectuando de 8-12 repeticiones para sujetos no entrenados y entre 3-6 series completando entre 6-12 repeticiones para sujetos entrenados (Kraemer & Ratamess, 2004). Es importante tener en cuenta que las cargas deben de ser medias-altas para la fuerza e hipertrofia y cargas baja para resistencia a la fuerza.

3.3.2. Intensidad

Entendemos por intensidad el grado de esfuerzo que supone un ejercicio o conjunto de ellos. Es necesario comprender que existe una relación inversa entre volumen e intensidad, puesto que, al aumentar la intensidad, nos vemos obligados a descender el volumen de trabajo, debido a que no se puede soportar, mientras que, para aumentar el volumen de trabajo, es necesario bajar la intensidad programada. Sin duda, la intensidad es un condicionante del nivel de experiencia y del estado de forma del deportista, y, posiblemente, la variable más complicada de dosificar a la hora de individualizar el entrenamiento. Esto demuestra la preocupación de los especialistas en ciencias del deporte por medir y cuantificar la intensidad de los ejercicios o de las sesiones de trabajo. Lo que ha generado una gran cantidad de estrategias que permiten valorar el esfuerzo producido, a través de herramientas, en gran medida tecnológicas, que aportan información desde un punto de vista objetivo, mediante números. Es entonces, cuando se hace posible la cuantificación de la intensidad en el entrenamiento. Los siguientes apartados representan, los métodos más comunes para llevar a cabo la interpretación de la intensidad durante las sesiones de fuerza, teniendo en común todos ellos hacen referencia a lo mismo, conocer el esfuerzo en relación con las repeticiones posibles.

3.3.2.1. Repeticiones a realizar en función de las realizables. (Fallo vs No fallo, Repeticiones en Reserva y Carácter del Esfuerzo)

Durante cada serie del entrenamiento de fuerza, independientemente de la carga utilizada, existen dos posibilidades: por un lado, realizar todas las repeticiones

posibles en una serie (entrenamiento al fallo) y por otro, no agotar todas las posibles repeticiones (entrenamiento hasta el no fallo). Existe en la literatura científica gran controversia sobre estos tipos de entrenamiento. Aunque algunos estudios (Davies, Orr, Halaki, & Hackett, 2016; Drinkwater et al., 2005; Folland et al., 2002; Nóbrega & Libardi, 2016) sugieren que el fallo muscular puede ser necesario para maximizar la hipertrofia muscular y la fuerza, también hay evidencias que indican que el entrenamiento al no fallo produce incluso mayores mejoras en cuanto a la ganancia de fuerza y potencia (Davies et al., 2016; Folland et al., 2002; Nóbrega & Libardi, 2016; Sampson et al., 2016). Sin duda son dos estrategias opuestas donde está claro que entrenar con menos repeticiones de las posibles, o con caracteres del esfuerzo bajo ha mostrado menor sensación de fatiga (Hackett & Cobley, 2018; Vieira, Dias, Lacio, Filipe, & Leita, 2019). Por lo tanto, si se consiguen adaptaciones similares, con niveles inferiores de percepción del esfuerzo para el entrenamiento hasta el no fallo, esto lo propone como un método más eficaz (Fisher, Blossom, & Steele, 2015). Además se ha comprobado cómo el entrenamiento hasta el fallo produce una mayor pérdida de rendimiento durante la sesión de entrenamiento (Fonseca et al., 2020; Griffiths et al., 2019; Sánchez Moreno, Rodríguez Rosell, Pareja Blanco, Mora Custodio, & González Badillo, 2017) necesitando más tiempo de recuperación (Navarro et al., 2017) e incluso afecta a días posteriores (Pareja Blanco et al., 2016; Párraga Montilla et al., 2018).

Es por ello que el entrenamiento hasta el fallo parece estar más orientado a programas orientados a la hipertrofia (Grgic et al., 2018b; Schoenfeld et al., 2017). Mientras que un diseño de entrenamientos basados en entrenar con bajo carácter del esfuerzo, dejando repeticiones por realizar, han demostrado producir mayores mejoras en cuanto al rendimiento de pruebas como altura de salto o sprint (Davies et al., 2016; Fonseca et al., 2020; Gonzalez Badillo et al., 2016; Navarro et al., 2017; Pareja Blanco et al., 2016).

Otra propuesta para cuantificar la intensidad del entrenamiento de fuerza son las repeticiones en reserva, o cómo se conoce en la literatura científica (Repetitions In Reserve RIR). Este concepto hace referencia al número de repeticiones que se dejan por hacer en una serie. Por ejemplo, RIR 2 quiere decir que hacemos X repeticiones y aún podríamos hacer 2 más hasta llegar al fallo, un ejemplo de entrenamiento al

no fallo. Mientras que un RIR 0 significa que no se dejan repeticiones por hacer, o lo que es lo mismo, entrenamiento al fallo. Se necesita de familiarización por parte de los deportistas, ya que es una medición subjetiva de intensidad. Zourdos MC. et al. (2016) han demostrado que existe una relación entre RIR y percepción subjetiva del esfuerzo (Rated Perceived Exertion RPE), mostrando una relación directa entre RPE y RIR, donde una RPE 10 se asocia con un RIR 0 y valores intermedios como RPE de 7 se ven relacionados con un RIR 3. Posteriormente, García Ramos et al (2018) también relacionó estos valores de RIR con la velocidad de ejecución.

Por otro lado, siguiendo la misma línea que los conceptos mencionados anteriormente, el carácter del esfuerzo (level of effort) representa la relación entre las repeticiones realizadas en función de las realizables (Gonzalez Badillo et al., 2016). Es necesario que el deportista interiorice las repeticiones que podría hacer con una carga determinada. De esta forma se puede prescribir entrenamiento en base a esas repeticiones posibles. Por ejemplo, si se persigue realizar 3 series de 10 repeticiones con un peso que se podría realizar 12, se presentaría de la siguiente forma: 3x10(12). Mientras que si comparamos la configuración anterior con 3x10(20), aunque compartan el mismo número de series y repeticiones, la carga es diferente, puesto que en la primera se usa la carga con la que se pudiera realizar 12 repeticiones y en la segunda opción la carga utilizada es menor, permitiendo completar 20 repeticiones. Por lo tanto, la intensidad varía, siendo más intensa la primera configuración.

3.3.2.2. RM y Velocidad de Ejecución

Comunmente, para el entrenamiento de fuerza la intensidad de un ejercicio se prescribía a través del porcentaje de la repetición máxima (%1RM), por ejemplo: 70% RM. Como ya se ha mencionado en la introducción, este método de cuantificar la intensidad de trabajo ha perdido protagonismo debido a las dificultades que suponen realizar una prueba de 1RM o la estimación de este mediante test de XRM. Como alternativa, ha surgido la medición de la velocidad de ejecución en la fase propulsiva durante los ejercicios de fuerza a través de un encoder lineal (González Badillo et al., 2011). Ya en el año 1991, el profesor González Badillo, en su libro "Halterofilia", proponía que "si pudiéramos medir la velocidad máxima de los

movimientos cada día y con información inmediata, este sería posiblemente el mejor punto de referencia para saber si el peso es adecuado o no. Un descenso determinado de la velocidad es un indicador válido para suspender el entrenamiento bajar el peso de la barra. También podríamos tener registrada la velocidad máxima registrada de cada levantador por cada tanto por ciento y en función de esto, valorar el esfuerzo.” Sin duda, el Dr. González Badillo ha sido todo un visionario para la época, impulsando así esta línea de investigación.

Fue en el año 2011, cuando Sánchez Medina y González Badillo proponen la pérdida de velocidad de ejecución en la serie como un indicador de fatiga neuromuscular durante el entrenamiento de fuerza. Dentro de los diferentes valores que aporta el encoder en cuanto a velocidad de ejecución (velocidad media, velocidad pico o velocidad media propulsiva) se ha utilizado comúnmente la Velocidad Media Propulsiva, o cómo se conoce en la literatura científica Mean Propulsive Velocity (VMP/MPV) (Pareja Blanco et al., 2014; Sánchez Moreno et al., 2017; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). La cual discrimina la fase final del movimiento donde si la carga es inferior al 70%RM existe un gran componente de frenado que puede alterar a la medición, infravalorando los valores de velocidad (Sanchez Medina, Perez, & Gonzalez Badillo, 2010).

Es en este estudio de 2011, donde Sánchez Medina y González Badillo (Sánchez Medina & González Badillo, 2011) establecen la siguiente fórmula para determinar la fatiga generada en cada serie:

Pérdida de velocidad (%) = 100 · (Velocidad de la última repetición – Velocidad de la primera repetición) / Velocidad de la primera

Fórmula 3. Pérdida de velocidad en la serie

Supongamos que durante un entrenamiento de fuerza en sentadilla donde completamos 3 series de 10 repeticiones, con la carga del 10RM (entrenamiento al fallo) y recuperación de 5 minutos entre series (figura 1). Si la carga está bien ajustada lo normal sería que no se pudiera completar las 10 series de la última serie e incluso en la segunda. La repetición más rápida de la primera serie se realiza a una velocidad de 0,76m/s y la más lenta de esta serie a 0,36m/s, lo que supone una

pérdida de velocidad de ejecución en la primera serie del -52,63%. Esta fórmula se aplica para cada una de las series que conforman el entrenamiento con el fin de determinar la pérdida de velocidad en cada una de ellas. Con estos datos, luego, es posible realizar un promedio aportando el valor de pérdida media de velocidad en el entrenamiento. En este caso el entrenamiento ha supuesto una pérdida de velocidad de un 49,26%.

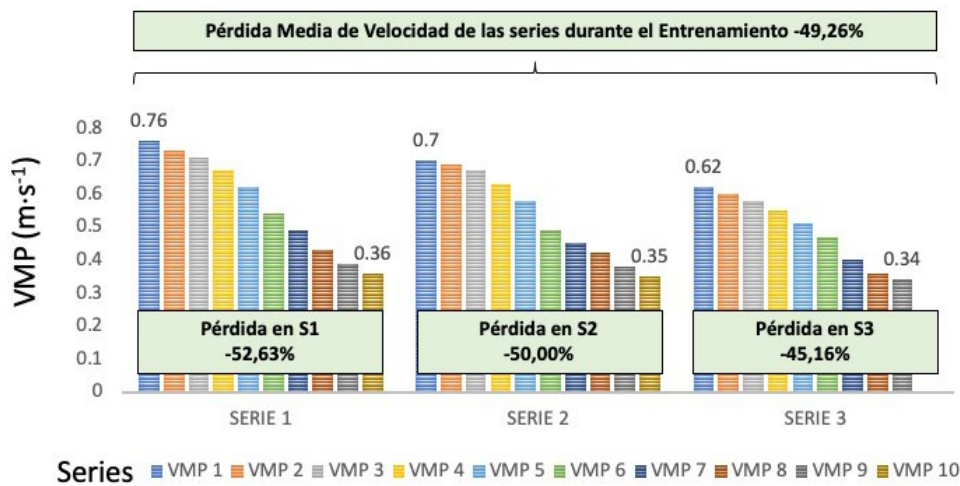


Figura 1: Ejemplo de cálculo de la pérdida de velocidad en un entrenamiento de sentadilla de 3 series de 10 repeticiones con 5 minutos de recuperación entre series, con el peso del 10RM (datos propios de nuestras investigaciones).

A partir de ahí, se ha abierto una gran línea de investigación en donde se ha comprobado como cada porcentaje del RM está asociado a un valor de velocidad de ejecución propio para cada ejercicio (Balsalobre Fernández, García Ramos, & Jiménez Reyes, 2018; Conceição, Fernandes, Lewis, González Badillo, & Jimenez Reyes, 2016; Marcos Pardo, González Hernández, García Ramos, López Vivancos, & Jiménez Reyes, 2019). De esta forma se puede evitar realizar test del RM que interfieran en la programación del entrenamiento y comprometan la integridad física del deportista. En base a esto, los investigadores García Ramos et al. (2018) sugirieron la Velocidad Media como la variable más apropiada para monitorizar la carga relativa (%RM) en el ejercicio de press de banca lanzado. Pero para que el uso

de la velocidad de ejecución sea fiable, es necesario que la intención del deportista sea desplazar la carga lo más rápido posible, de no ser así estos valores no serán reales.

3.3.2.3. Índice de esfuerzo

El índice de esfuerzo fue propuesto por David Rodriguez Rosel et al. (2018) como indicador de intensidad en un entrenamiento de fuerza. Para calcular este Índice es necesario multiplicar el valor de la repetición más rápida del entrenamiento por el porcentaje de pérdida a lo largo de todas las series. Por ejemplo, en un entrenamiento de fuerza en sentadillas, con una carga relacionada con un 10RM se ha realizado la repetición más rápida a una velocidad de 0,75m/s y tras completar tres series de 10 repeticiones se ha experimentado una pérdida de velocidad de un 47%. ($IE = \text{velocidad de la repetición más rápida (0,75)} * \text{pérdida media de velocidad en la sesión (47)} \rightarrow IE=28$). A través de este índice podremos conocer la intensidad del entrenamiento realizado y comparar el efecto de diferentes configuraciones, puesto que, en esta investigación, los autores han relacionado diferentes IE con la concentración de lactato como medida metabólica de intensidad.

3.3.2.4. Tiempo de recuperación

Son muchos los artículos que han reportado diferencias en cuanto respuesta aguda y adaptaciones tras el entrenamiento con diferentes tiempos de recuperación entre series (Abdessemed, Duche, Hautier, Poumarat, & Bedu, 1999; Ammar et al., 2019; Davies, Halaki, Orr, Helms, & Hackett, 2019; Girman, Jones, Matthews, & Wood, 2014; Miranda et al., 2009; Tan, 1999; Willardson, 2006; Willardson & Burkett, 2008). En relación con las adaptaciones conseguidas, el Colegio Americano de la Medicina Deportiva (Adams et al., 2002) propuso recuperaciones entre serie entre 30 y 90 segundos para aquellos entrenamientos orientados a la hipertrofia, mientras que, para entrenamientos dedicados a la mejora de los niveles de fuerza o potencia, se debe recuperar entre 3 y 5 minutos entre series. En las últimas investigaciones, Schoenfeld et al. (2016) demuestra cómo recuperaciones en torno a 5 min producen mayores incrementos de masa muscular en comparación con las recuperaciones cortas de entre 30 y 90 segundos. Esto es debido sobre todo al mayor protagonismo

del tiempo bajo tensión, tensión mecánica, daño muscular y volumen realizado. Y es que el número máximo de repeticiones que se puede completar es una de las variables más utilizadas para cuantificar el efecto de los intervalos de descanso entre series sobre el rendimiento mecánico (Rahimi, 2005; Rahman Rahimi, Sadeghi, Mozafari', & Faraji, 2009; Senna, Salles, Prestes, Mello, & Simão, 2009). En el estudio de Rahimi (2005) se evaluó el efecto de tres intervalos de descanso entre series (1, 2 y 5 minutos) sobre el número total de repeticiones completadas durante una sesión de RT que consta de 4 series al 85% RM con la sentadilla, y mostraron que 5 minutos de descanso entre series permitieron el mayor volumen. Senna y col. (2009) también descubrieron que el número de repeticiones completadas durante una sesión de fuerza con los ejercicios de press de piernas, extensión de piernas, curl de piernas, press de banca, pec-deck y tríceps fue mayor usando 5 minutos en comparación con 2 minutos de descanso entre series. Por otro lado, 3 minutos de ha sido recomendado por Ammar et al. (2019) para que prevalezca la los niveles de potencia y la técnica de ejecución durante sucesivos Clean and Jerk con el 100%RM. Sin embargo, el efecto de los intervalos de descanso entre series sobre las variables mecánicas cuando las series de fuerza no se realizan a fallo muscular ha recibido menos atención científica.

Por otro lado, existe una corriente que aboga por incluir recuperaciones entre grupos de repeticiones o entre cada repetición (Cluster o Inter Repetition Rest IRR) (Haff & Stone, 2003; Haff et al., 2008; Lawton, Cronin, & Lindsell, 2006; Lawton, Cronin, Drinkwater, Lindsell, & Pyne, 2004; Tufano, Brown, & Haff, 2016). Esto se fundamenta bajo la teoría de que, durante una serie convencional de repeticiones continuas, se produce un descenso de la velocidad de ejecución, debido a la fatiga muscular, atribuida principalmente a la indisponibilidad de fosfocreatina (PCr) y el grado de resíntesis de adenosín trifosfato (ATP) en los músculos que participan en la acción requerida (Bogdanis, Nevill, Boobis, & Lakomy, 1996; Wells, Selvadurai, & Tein, 2009). La depleción de los niveles de ATP y PCr, se ve relacionada con un aumento en la acumulación de lactato en el músculo, y consecuentemente, un peor rendimiento (Gorostiaga et al., 2012). Por consiguiente, durante el entrenamiento de fuerza a través de repeticiones continuas se experimenta una disminución de velocidad de ejecución, siendo especialmente notoria en la segunda mitad de repeticiones de una serie (Haff et al., 2008). Por lo tanto, el efecto principal de las

configuraciones de la serie de Clúster es la reducción de la fatiga en comparación con las configuraciones de la serie tradicional basada en repeticiones continuas al suministrar un pequeño periodo de recuperación que facilita la resíntesis de ATP (Haff et al., 2008). Estudios previos han demostrado que las configuraciones de la serie en Cluster o IRR, con descanso entre 10-30 segundos (Tufano, Brown, et al., 2016) pueden aumentar la velocidad y potencia (Falls, 2003; Hardee, Triplett, Utter, Zwetsloot, & McBride, 2012; Iglesias Soler et al., 2012; Izquierdo et al., 2009; Latella, Teo, Drinkwater, Kendall, & Haff, 2019; Lawton et al., 2006; Merrigan et al., 2020; Oliver et al., 2015b; Tufano, Conlon, Nimphius, Brown, Seitz, Williamson, & Haff, 2016) además del volumen de entrenamiento de fuerza (Denton, 2005; Iglesias Soler, Carballeira, Sánchez Otero, Mayo, & Fernández Del Olmo, 2014; Lawton et al., 2004; Rahimi, 2005; Tufano, Brown, et al., 2016; Tufano, Conlon, Nimphius, Brown, Harry, et al., 2016; Tufano, Conlon, Nimphius, Brown, Seitz, Williamson, & Gregory Haff, 2016), con una menor fatiga (Girman et al., 2014; Iglesias Soler et al., 2012; Mora Custodio et al., 2018) al tiempo que reducen el esfuerzo percibido (García Ramos et al., 2016; Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012; Mayo et al., 2014; Tufano, Brown, et al., 2016; Vasconcelos, Costa, & Santos, 2019). Por lo tanto, el entrenamiento en Cluster o IRR puede ser beneficioso no solo para los atletas (Hansen, Cronin, & Newton, 2011; Hansen, Cronin, Pickering, & Newton, 2011; Jusoh, Shak, & Tufano, 2019), sino también para la población en general, ya que se puede realizar la misma cantidad de trabajo con menos percepción de esfuerzo (Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012) y se ve afectada en menor medida la técnica de ejecución (Haff & Stone, 2003; Hardee, Lawrence, Zwetsloot, et al., 2012). Asimismo, se ha podido comprobar cómo algunas configuraciones de Cluster pueden producir Potenciación Post Activación (Boullosa, Abreu, Beltrame, & Behm, 2013; Dello Iacono, Beato, & Halperin, 2019) debido a la capacidad de realizar repeticiones sin pérdida de velocidad. Ya que el efecto más sorprendente de las configuraciones de Cluster o IRRR es el mantenimiento de la velocidad y potencia durante un mayor número de repeticiones y, por consiguiente, lo posiciona como una buena alternativa para el entrenamiento de fuerza o potencia.

Por otro lado, al incluir descansos entre repeticiones o entre conjunto de ellas, se consigue un mayor volumen de entrenamiento por lo que podría ser interesante incluirlo con el objetivo de mejorar los niveles de hipertrofia. Para ello

es necesario modificar cargas de trabajo y tiempos de recuperación, de esta forma, se podrá orientar el entrenamiento hacia un objetivo u otro. Los investigadores Tufano et al. (2017) evaluaron la respuesta perceptual, metabólica y endocrina de tres configuraciones de la serie. En cada uno de estos protocolos se distribuyó de forma diferente 36 sentadillas con la carga del 75% del 1RM y 420 segundos de recuperación cada protocolo. Uno de los protocolos consistió en 3 bloques de 3 series de 4 repeticiones, el segundo en 9 series de 4 repeticiones y el tercer protocolo en 36 repeticiones con descanso entre cada una de ellas. Los resultados mostraron una respuesta similar en cuanto al esfuerzo percibido y los cambios metabólicos y hormonales.

Está claro que esta metodología de entrenamiento ofrece una amplia posibilidad para diseñar las configuraciones de las series induciendo diferentes estímulos. La mayoría de los estudios que abordan esta temática únicamente se centran en diferentes respuestas agudas. Lawtoney al. (2004) estudiaron las adaptaciones en cuanto a las ganancias de fuerza para el ejercicio de press de banca entre un entrenamiento tradicional de 4 series de 6 repeticiones recuperando 260 segundos entre cada serie vs un protocolo Cluster de 8 series de 3 repeticiones recuperando 113 segundos entre cada repetición. Ambos con la carga que representó el 6RM. Los resultados mostraron que el protocolo tradicional consiguió significativamente mayores incrementos en cuanto a la mejora de los niveles de fuerza. En la misma línea, encontramos los resultados propuestos por Nicholson et al. (2016), quienes estudiaron el efecto de diferentes configuraciones de la serie, Cluster y tradicional tras 6 semanas de entrenamiento de fuerza en sentadilla, reportando que el entrenamiento tradicional produce mayores ganancias de fuerza frente al entrenamiento Cluster. Metodológicamente presenta algunas limitaciones puesto que cada protocolo usaba intensidades de la carga, tiempo de recuperación y volúmenes diferentes, lo que sugiere que estas adaptaciones se deben a la diferencia de intensidad de trabajo y no a la diferencia entre protocolos. En contraposición, Oliver et al. (2013) tras estudiar las adaptaciones conseguidas por el entrenamiento de fuerza en press de banca y sentadilla durante 12 semanas, entre un protocolo tradicional (4 series de 10 repeticiones recuperando 2 minutos entre series con el 75%RM) y otro Cluster (8 series de 5 repeticiones recuperando 1 min entre series) encontraron mejoras significativas en cuanto a las ganancias de fuerza y potencia

para el protocolo Cluster, quizás debido al amplio periodo de entrenamiento y a la experiencia de los sujetos.

En cuanto a las adaptaciones conseguidas en base a la relación F-V, Iglesias Soler et al. (2017) compararon los efectos de 5 semanas de entrenamiento de fuerza en el ejercicio de extensión de rodilla para un protocolo de fuerza tradicional (4 series de 8 repeticiones con la carga 10RM recuperando 3 minutos) y otro IRR (32 repeticiones recuperando 17,4 segundos entre cada una). Los resultados revelaron que no se encontraron diferencias en las adaptaciones conseguidas a pesar de que el protocolo IRR realizaba velocidades más altas en cada entrenamiento. En línea con este estudio fueron los resultados de la investigación realizada por Morales Artacho et al. (2018), quienes compararon los efectos de la relación FV tras 3 semanas de entrenamiento de fuerza en media sentadilla. Estos investigadores tampoco encontraron diferencias significativas en cuanto a las mejoras de las variables de fuerza, velocidad y potencia entre protocolos, argumentando que es posible que 3 semanas de entrenamiento fueran pocas para conseguir adaptaciones diferentes entre protocolos. Con resultados diferentes, en la reciente publicación de Rial Vázquez et al. (2020) estos investigadores comprobaron la respuesta tras 5 semanas de entrenamiento para dos protocolos diferentes. El primero de ellos, tradicional consintió en realizar 4 series de 8 repeticiones y 5 minutos de recuperación entre series, mientras que en el segundo protocolo (Cluster) se realizaban 16 series de 2 repeticiones con 1 min de descanso entre series. Ambos protocolos se llevaron a cabo para press de banca, sentadilla, jalón en máquina y curl de isquios en máquina, con la carga del 10RM y recuperando 5 minutos entre ejercicios. Los resultados mostraron cambios en cuanto a los valores de velocidad en sentadilla, mejorando en el protocolo Cluster. Esto sugiere que esta configuración de las series puede modular cambios en la relación fuerza velocidad, especialmente durante el ejercicio de sentadillas.

Además de que existen pocas publicaciones que contemplen la adaptación al entrenamiento de esta metodología de trabajo, existe gran heterogeneidad entre estas. Por lo que se hace necesario investigaciones que valoren las adaptaciones conseguidas con entrenamientos de fuerza tipo Cluster frente a tradicionales, quedando claro que los efectos agudos reportados en la literatura que comparan

protocolos de entrenamiento Cluster vs tradicional, postulan al entrenamiento Cluster como una herramienta idónea para soportar mayores volúmenes de trabajo, a mayores velocidades y con menores niveles de fatiga acumulada y percepción del esfuerzo.

3.3.2.5. Percepción del Esfuerzo a través de escalas subjetivas de percepción del esfuerzo

Durante el día a día de entrenamiento de fuerza, la evaluación del rendimiento no se hace fácil. Muchos métodos de evaluación de la fatiga son complejos de utilizar y más aún cuando se trabajan con varios deportistas a la vez. Una alternativa práctica para poder cuantificar la fatiga es la percepción subjetiva del esfuerzo. Para ejercicios de resistencia como carrera o bici, el científico Borg en los años 70 diseñó una escala subjetiva del esfuerzo (Borg, 1970). Esta escala puntuaba de 6 a 20 si el esfuerzo estaba suponiendo muy poco esfuerzo hasta esfuerzo máximo. Esta numeración se originó en un primer lugar al relacionar la puntuación de 6 con 160 pulsaciones por minuto (ppm) y 20 con 200ppm. La inquietud por utilizar esta escala en el entrenamiento de fuerza llevó a comprobar la pérdida de fiabilidad al no comportarse la frecuencia cardíaca de la misma manera que en ejercicio aeróbicos. Es por ello, que Robertson et al. (2003) propusieron una escala del 1-10 para el uso de la percepción del esfuerzo durante el entrenamiento de fuerza, esta es conocida como escala OMNI.

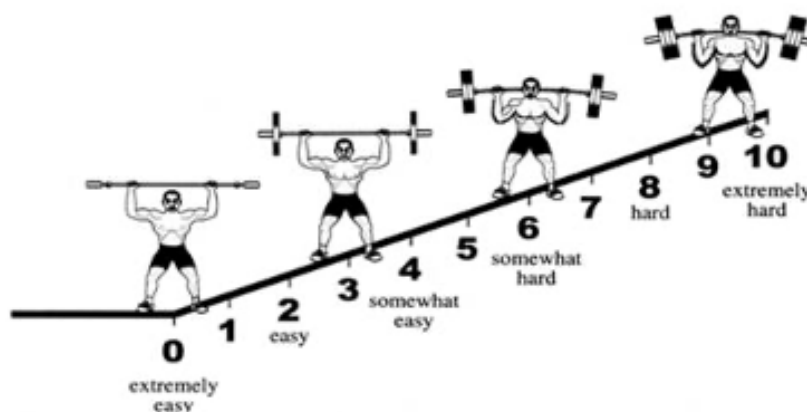


Figura 2: Escala de Percepción Subjetiva del Esfuerzo OMNI

Fue unos años después, cuando los investigadores Naclerio et al. (2011) quienes determinaron la aplicabilidad de la escala de percepción de esfuerzo OMNI para el control del entrenamiento de fuerza. Esto lo consiguieron relacionando los valores de la escala con la respuesta metabólica de lactato tras repeticiones hasta el fallo en press de banca a diferentes intensidades (40, 50, 60,70,80,90 %1RM). Esto supuso un gran avance, puesto que se consigue relacionar la escala de percepción del esfuerzo con la respuesta de un indicador de fatiga metabólica, de esta forma se puede tener una orientación de la cantidad de lactato acumulado sin necesidad de tener un medidor de lactatemia.

En la revisión de Helms et al. (2017) muestran cómo uno de los mayores avances usando la escala OMNI fue relacionar esta escala con las repeticiones en reserva. La investigación fue llevada a cabo por Zourdos et al. (2016), donde estudiaron la relación usando el ejercicio de sentadilla para sujetos entrenados y no entrenados. Los resultados de este estudio mostraron una relación entre la velocidad de ejecución, las repeticiones en reserva y la escala OMNI. Esta novedad sirvió para proponer la percepción de repeticiones en reserva cómo un indicador válido para estimar la intensidad del ejercicio, y, por lo tanto, aportar una idea previa de la posible fatiga inducida. Cabe destacar que estos autores recalcan que los sujetos experimentados muestran datos más fiables que los no entrenados.

Esta escala subjetiva del esfuerzo sin duda es una herramienta muy cercana al campo práctico del entrenamiento, donde no se disponen de grandes recursos. Los investigadores Naclerio & Larumbe Zabala (2016) fueron capaces de proponer una fórmula para predecir la carga a través de la velocidad de ejecución y la escala OMNI. Esto abre un amplio abanico de posibilidades para introducir esta herramienta en la investigación del entrenamiento de fuerza, con la intención de aportar una respuesta práctica y fácil de medir al explorar diferentes entrenamientos de fuerza.

3.3.3. Frecuencia

Se entiende por frecuencia al número de sesiones realizadas en una semana. Esta variable depende del objetivo de entrenamiento. Dentro de una rutina de trabajo de fuerza se puede instaurar diferentes frecuencias en función del grupo muscular. Por ejemplo, trabajar fuerza de piernas 3 días por semana y trabajar pecho y bíceps 2 días por semana. La búsqueda de la frecuencia idónea no solo dependerá del objetivo del entrenamiento, sino que se verá alterada por diversos factores como la edad, el sexo, grupo musculares, experiencia, objetivo etc... (Grgic et al., 2018a; Schoenfeld, Ratamess, Peterson, Contreras, & Tiryaki Sonmez, 2015). Se ha demostrado que una única sesión semanal no es suficiente para lograr adaptaciones en sujetos entrenados, mientras que dos o tres sesiones del mismo grupo muscular, puede suponer la frecuencia necesaria para maximizar las adaptaciones deseadas. Dankel et al. (2017) ha demostrado una mayor mejora en cuanto a niveles de hipertrofia al aumentar la frecuencia de entrenamiento vs. volúmenes altos en pocas sesiones. Respalda esta idea, diversos estudios (Ochi et al., 2018; Schoenfeld, Grgic, & Krieger, 2019) recomiendan realizar una frecuencia de 3 sesiones semanales frente a 1 sesión semanal si el objetivo se basa en ganancia de fuerza e hipertrofia .

En lo referido a la ganancia de fuerza en la revisión y metanálisis de Grgic et al. (2018a) sugieren que un número elevado de sesiones semanales se traduce en mayores ganancias de fuerza muscular. Sin embargo, estos efectos parecen estar condicionados principalmente por el volumen de entrenamiento, ya que, con el volumen igualado, no se han encontrado efectos significativos al implementar una mayor frecuencia de entrenamiento en cuanto a las ganancias de fuerza muscular. Por lo tanto, desde un punto de vista práctico, un aumento del volumen, a través de un número mayor de sesiones de entrenamiento, probablemente resulte en mayores ganancias de fuerza muscular. Sin embargo, no está claro si la frecuencia de entrenamiento por sí sola puede implicar efectos significativos sobre la ganancia de fuerza.

3.3.4. Tiempo Bajo Tensión TUT

Durante la ejecución de cualquier ejercicio se puede priorizar la fase concéntrica (origen e inserción de la musculatura agonista se acercan) o excéntrica (origen e inserción de la musculatura agonista se separan). En el caso de la sentadilla, la fase concéntrica se considera la subida (extensión de rodilla y cadera), mientras que la fase excéntrica representa la bajada (flexión de rodilla y cadera). Es más común en las diferentes rutinas de entrenamiento de fuerza hacer énfasis sobre la fase concéntrica, aunque, por otro lado, acentuar la fase excéntrica de forma correcta puede presentar diversos beneficios. Se entiende por tiempo bajo tensión (TUT) el tiempo total de todas las fases de contracción durante el entrenamiento (Rathleff, Thorborg, & Bandholm, 2013). El TUT se incrementa a medida que aparece la fatiga y decae la velocidad de ejecución durante la fase concéntrica y al diseñar sesiones de entrenamientos de carácter excéntrico, ya que acentúa de forma intencionada el TUT (Tran, Docherty, & Behm, 2006). Fisiológicamente, se ha demostrado que un mayor TUT aumenta la síntesis de proteína miofibrilar más que un menor TUT después de una única sesión de entrenamiento de fuerza en sujetos sanos (Burd et al., 2012).

El entrenamiento de fuerza aumentando el TUT de la fase excéntrica se utiliza para mejorar el rendimiento deportivo, la rehabilitación de lesiones y la ganancia de hipertrofia (Arnason, Andersen, Holme, Engebretsen, & Bahr, 2007; Brandenburg, Docherty, & Brandenburg, 2002; Chaabene, Prieske, Negra, & Granacher, 2018; Moisés de Hoyo et al., 2016; Mike, Kerksick, & Kravitz, 2015; Walker et al., 2016). Se sabe que el potencial de fuerza excéntrica es mayor que el concéntrico, la producción de fuerza máxima es $\approx 20-50\%$ mayor durante las acciones excéntricas (Enoka, 1996). Por lo tanto, durante el entrenamiento de fuerza convencional, la porción excéntrica del movimiento rara vez se estimula por completo, ya que la magnitud de la carga está limitada por la fuerza concéntrica máxima. Para superar esta limitación, se ha incluido frecuentemente un método de entrenamiento donde se da prioridad a la fase excéntrica (realizando de forma más lenta la fase excéntrica, en torno a los 3 segundos) y se le ayuda al deportista a levantar la carga en la fase concéntrica. Otra alternativa, la cual supone algo más de exigencia es el entrenamiento conocido

como “entrenamiento excéntrico acentuado”, donde esta fase excéntrica se acentúa utilizando una carga superior a la que podría levantar de forma convencional ($\pm 120\%1RM$) (Douglas, Pearson, Ross, & Mc Guigan, 2018; Wagle et al., 2017). Se cree que la mayor fuerza que puede producirse durante las acciones excéntricas supramáximas junto con el microtraumatismo muscular elevado inducido por estas acciones estimula el proceso de adaptación muscular (Wagle et al., 2018, 2017; Wagle et al., 2018). Existe una fuerte evidencia que respalda la superioridad del entrenamiento excéntrico acentuado en comparación con el entrenamiento solo concéntrico para inducir ganancias en la fuerza máxima (Walker et al., 2016) y el mayor nivel de daño muscular provocado (Gibala et al., 2000). Sin embargo, los profesionales en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte deben preocuparse por el alto daño muscular inducido por el entrenamiento excéntrico acentuado ya que puede causar perturbaciones en la tasa metabólica posterior al ejercicio (Dolezal et al., 2000) y alargar el proceso de recuperación (Brancaccio, Lippi, & Maffulli, 2010).

3.4. EL PAPEL MODULADOR DE LA FATIGA EN EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA

La fatiga muscular se entiende por un decremento temporal del rendimiento durante el entrenamiento o competición (Allen & Westerblad, 2001). Este fenómeno es un proceso multifactorial que se concibe como cualquier reducción en la capacidad máxima para generar fuerza, en la velocidad de alargamiento y acortamiento de las fibras musculares provocando una reducción en la producción de potencia. Viéndose afectada por el tipo de tarea, la intensidad, la frecuencia de entrenamiento etc. (Byrne, Twist, & Eston, 2004; Gandevia, 2001). La depleción de sustratos energéticos, daño muscular, inefectividad del sistema nervioso central y periférico etc, son algunos de los factores que desencadenan este proceso (Ament & Verkerke, 2009; Marino, Gard, & Drinkwater, 2011) y afectan de forma gradual desde el inicio de la actividad (Enoka & Duchateau, 2008). Por lo tanto, en la literatura científica existe un gran interés por conocer los mecanismos de aparición de la fatiga en relación con el esfuerzo y a la intensidad del entrenamiento, cuantificándola a través de indicadores mecánicos, metabólicos, bioquímicos, neuromusculares y perceptivos.

Por lo tanto, la posibilidad de cuantificar la fatiga producida durante un entrenamiento nos permitirá conocer la intensidad a la que se está sometiendo al deportista. Existen algunos métodos que nos permiten conocer el efecto provocado por el estímulo inducido a través de un feedback inmediato, lo que permite adaptar la sesión de entrenamiento y ajustar la carga. Esto supone una gran ventaja, ya que debemos considerar al entrenador como un gestor de fatiga, debido a que las adaptaciones producidas dependen en gran medida del tipo de fatiga ocasionada. Es por ello por lo que la valoración de la fatiga a través de cualquier método válido debe considerarse como una herramienta indispensable en el proceso de entrenamiento. No sólo como medida del efecto agudo del entrenamiento, también deber usarse para cuantificar el proceso de recuperación del deportista días después. Por ello, es importante conocer si el deportista se encuentra en disposición de realizar entrenamientos exigentes, habiendo recuperado correctamente de las sesiones anteriores. Incluso si ha supercompensado, es interesante ajustar la carga de entrenamiento y esto únicamente se puede conseguir midiendo la fatiga a través de cualquiera de sus manifestaciones. Sin embargo, a pesar de la importancia de la fatiga, existen pocos estudios que reporten cómo la manipulación de las diferentes variables del entrenamiento de fuerza puede afectar a la evolución de la recuperación del rendimiento, lo que nos aportaría una información clave para la programación del entrenamiento de fuerza.

3.4.1. Fatiga Central y Periférica

El sistema nervioso juega un papel fundamental durante el entrenamiento. No podemos olvidar que es el encargado de transportar la información para que los músculos se contraigan y podamos aplicar fuerza. La contracción se produce de forma voluntaria gracias a la señal que se inicia en el cortex cerebral, descendiendo hasta las motoneuronas de la médula espinal (Chicharro & Mojares, 2008). Al excitar las neuronas, se propaga el potencial de acción hasta la unión neuromuscular, donde se realiza la contracción a través del acercamiento de los filamentos proteicos de actina y miosina, estableciendo puentes cruzados (Allen, Lamb, & Westerblad, 2008; Westerblad, Lee, Lannergren, & Allen, 1991). Este proceso de conducción de información a través del impulso nervioso, se puede ver afectado a consecuencia del esfuerzo que implica un ejercicio, entrenamiento o competición,

desencadenando fatiga (Blain & Hureau, 2017; Gandevia, 2001). La contribución del sistema nervioso a la fatiga puede tener su origen a nivel central o periférico. El término fatiga central se asocia a un decremento del Sistema Nervioso Central para transferir la información, desencadenando una reducción en la activación voluntaria para aplicar fuerza (Davis & Bailey, 1997).

Por el contrario, la fatiga periférica hace referencia al deterioro de la capacidad de aplicar fuerza debido a procesos distales en la unión neuromuscular, incluyendo cambios metabólicos y bioquímicos al verse relacionado con el daño muscular (Carroll et al., 2016; Gandevia, 2001; Marquez et al., 2016; Morel, Lapole, Liotard, & Hautier, 2019). Esto es debido a un agotamiento de las reservas de energía, la acumulación de diversos subproductos o el deterioro del mecanismo de contracción muscular en respuesta al ejercicio (Zajac, Chalimoniuk, Maszczyk, Gotas, & Lngfort, 2015). La magnitud de la fatiga, y el protagonismo de los procesos distales o centrales se verán condicionados por variables como el tipo de ejercicio, la intensidad, duración etc. (Boccia et al., 2017; Boccia et al., 2018; Giandolini et al., 2016; O'Leary, Morris, Collett, & Howells, 2016; Thomas et al., 2018; Trinidad et al., 2018).

Como aplicabilidad práctica, se propone la medición de la fatiga neuromuscular, tanto central como periférica, para conocer el efecto del entrenamiento (Behm, Drinkwater, Behm, Reardon, & Fitzgerald, 2002; Marquez et al., 2016) y para medir el proceso de recuperación de este (Munn, Herbert, Hancock, & Gandevia, 2005; Taylor & Gandevia, 2008). A través de contracciones isométricas máximas y la electromiografía se puede conocer la capacidad contráctil que presenta el deportista en momentos pre y post entrenamiento (González Izal, Malanda, Gorostiaga, & Izquierdo, 2012; Howatson, Brandon, & Hunter, 2015), ya que una reducción de la fuerza máxima generada durante una contracción isométrica máxima, es un indicador fiable de fatiga (Carroll et al., 2016). A través de la *Twitch Interpolated Technique* (TIT) (Fig 3) o cómo se puede entender en español, estimulación eléctrica superimpuesta, se puede determinar la fatiga central y periférica ocasionada por el entrenamiento. Este método consiste en proporcionar un impulso eléctrico sobre el nervio o el vientre muscular durante una contracción isométrica máxima y posteriormente en reposo.

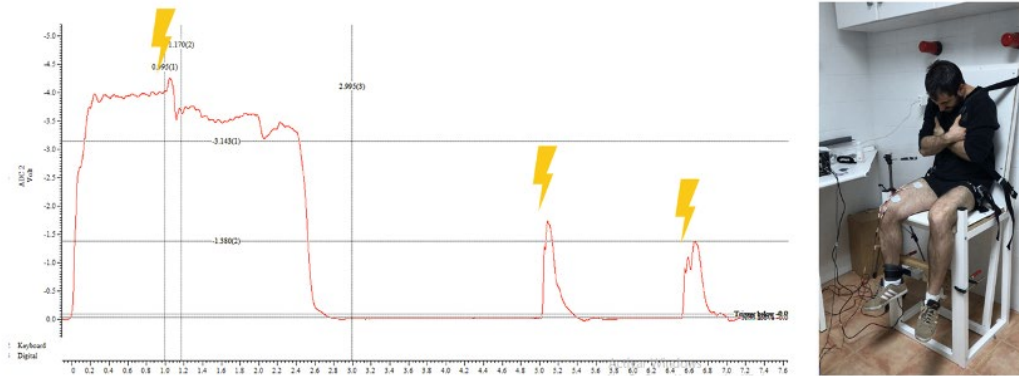


Figura 3: Registro de fuerzas durante una Contracción Isométrica Máxima con estimulación eléctrica superimpuesta (Twitch Interpolation Technique, TIT) durante la contracción y en reposo para la determinación de la fatiga central y periférica de la musculatura extensora de rodilla.

Ala hora de explorar la fatiga central se suele proporcionar estímulos simples de alta frecuencia durante con contracción isométrica máxima. De esta forma es posible determinar el déficit de activación voluntaria (AV) (comparando la diferencia entre la fuerza generada por la contracción tetánica y la voluntaria), al experimenta una disminución de este valor a lo largo de las series o del entrenamiento. Por otro lado, en lo que refiere a la fatiga periférica, se estudia al comparar la amplitud del pico de fuerza registrado mediante la estimulación eléctrica estando el músculo en reposo al acabar cada serie o al finalizar el entrenamiento, respecto a los valores basales (Marquez et al., 2016; Taylor & Gandevia, 2008; Todd, Gorman, & Gandevia, 2004). Para ello es necesario determinar la intensidad óptima del estímulo eléctrico, el cual se consigue aumentando la electricidad hasta el punto en el que se produzca saturación en la generación de fuerza y esta no aumente. Tras determinar esta intensidad óptima, se elige un valor de intensidad supramaxima generalmente en torno al 120-150% de esta, con el fin de garantizar un reclutamiento completo de las fibras que se encuentran bajo los electrodos (Millet, Bachasson, Temesi, & ... 2012). Esta estimulación se realiza a bajas (10-20Hz) y altas (50-100Hz) frecuencias, y el ratio entre estas permite determinar el tipo de fatiga periférica. La fatiga detectada

a baja frecuencia se caracteriza por una mayor pérdida relativa de fuerza a baja frecuencia de estimulación y una recuperación lenta. La fatiga de baja frecuencia se asocia generalmente con un fallo en el acoplamiento excitación-contracción, ya que las mediciones intracelulares han demostrado que este modelo de fatiga se debe a una reducción en la liberación de Ca^{2+} (Hill, Thompson, Ruell, Thom, & White, 2001). Por el contrario, la fatiga de alta frecuencia se caracteriza por una pérdida excesiva de fuerza a altas frecuencias de estímulo y se atribuye, al menos en parte, a una acumulación de K extracelular. En la fatiga de alta frecuencia, la rápida recuperación de la fuerza se produce cuando se reduce la frecuencia de los estímulos (Carroll et al., 2016). Al estudiar el decremento de fuerza aplicada a través del ratio 10:100 (Estimulación a baja y alta frecuencia) se puede determinar alteraciones en la liberación del Ca^{2+} durante el proceso de acoplamiento de contracción (Millet et al., 2012).

En la literatura científica podemos encontrar diversas investigaciones que exploran la fatiga central y periférica tras diferentes entrenamientos de fuerza. Los investigadores Bhen et al. (2002), estudiaron la respuesta de la activación muscular a nivel de activación voluntaria (fatiga central) y contracción evocada en reposo (fatiga periférica) tras 5, 10 y 20 repeticiones máximas en flexión de codo recuperando 30 segundos, 1, 2 y 3 minutos. Los resultados de este estudio mostraron una mayor inactivación muscular con mayor número de repeticiones, siendo insuficiente la recuperación de 3 minutos en todos los protocolos. Concluyó que la fatiga se agudiza con el volumen de entrenamiento y que no se recuperan los valores basales en las contracciones isométricas máximas, ni si quiera a los 3 minutos de recuperación para ninguno de los protocolos. Por otro lado, Brandon et al. (2015) estudiaron la respuesta de activación tras un entrenamiento de fuerza consistente en 10 series de 5 repeticiones con carga ligera (50%RM), moderadas (75%RM) y pesada (85%RM) en el ejercicio de sentadilla con atletas olímpicos. Los resultados denotaron que el trabajo con cargas moderadas permitía un entrenamiento eficiente y un descenso no significativo de las variables de rendimiento. A diferencia de las investigaciones anteriores Howatson et al. (2015), reportaron la respuesta aguda (inmediatamente después) y tardía (post 24 horas) tras dos entrenamientos de fuerza de 4 series de 5 repeticiones, uno orientado a la fuerza máxima y otro a la potencia. Los resultados señalaron que los niveles de activación muscular no se recuperaron a las 24h para

el entrenamiento orientado a la fuerza máxima.

Son varios los procesos distales que pueden verse afectados por el entrenamiento, desencadenando fatiga periférica y como consiguiente, comprometiendo la capacidad contráctil de la musculatura. En primer lugar, es importante entender que en el exterior de la membrana celular se encuentra Na^+ y K^+ , conformando el mecanismo conocido como bomba Sodio-Potasio. Mediante el flujo de estos iones hacia el interior de la membrana se produce la propagación del impulso nervioso o potencial de acción, originando la contracción (Chicharro & Mojares, 2008). Para que la bomba sodio-potasio funcione es necesario el ATP, por lo tanto, un descenso de este sustrato afectará a la efectividad del Potencial de acción. Otra muestra de fatiga periférica es la afectación de la excitabilidad sarcolema, el cual se puede apreciar durante una reducción de la actividad electromiográfica (Pasquet, Carpentier, Duchateau, & Hainaut, 2000).

La fatiga de baja frecuencia es sensible a la reducción de la liberación de Ca^{2+} . Pero para comprender esto es necesario entender que la llegada del impulso eléctrico a la célula muscular hace que el retículo sarcoplasmático libere grandes cantidades de iones de calcio. Estos iones intervienen en la contracción, ya que dejan libre los puntos de unión entre la actina y miosina (Chicharro & Mojares, 2008). Por lo tanto, un descenso en la liberación del calcio o en la depleción del ATP, origina dificultad para que sean efectivos los puentes cruzados de actina y miosina, comprometiendo portanto, la contracción muscular y esto se puede apreciar gracias a la estimulación con baja frecuencia (Hill et al., 2001).

Diferentes estudios destacan la conexión entre los cambios en los productos metabólicos de la contracción muscular y la función del sistema nervioso central, por la estimulación de las vías aferentes III y IV (Zajac et al., 2015), responsables de la sensación del dolor (Palastanga, Field, & Soames, 2007). Las fibras aferentes del grupo III, mielinizadas, son más mecanosensibles, y estimuladas preferentemente en respuesta a la producción de fuerza muscular (Hayes, Mccord, Koba, & Kaufman, 2009; Rotto & Kaufman, 1988). Por el contrario, las fibras aferentes no mielinizadas del grupo IV son principalmente metabosensibles, en comparación con el grupo III (Haouzi, Hill, Lewis, & Kaufman, 1999). De alguna forma, esto desencadena

que el daño muscular proporciona un input o feedback aferente con interferencias que ocasionará un output deficiente, reflejándose una respuesta motora ineficaz. Desarrollando fatiga central y atenuando la fatiga periférica durante el ejercicio (Taylor, Amann, Duchateau, Meeusen, & Rice, 2016).

La fatiga periférica se relaciona con el incremento de marcadores daño muscular y otros biomarcadores, al deteriorarse la membrana celular, reflejando la incapacidad de la musculatura por contraerse (Zhang, Yeung, Allen, Qin, & Yeung, 2008). Lo que supone una gran posibilidad de estudios novedosos que relacionen diferentes marcadores de daño muscular con esta perspectiva a nivel neural tras diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza.

3.4.1.1. Indicadores Bioquímicos

Durante el entrenamiento de fuerza se producen diversos procesos que afectan a las estructuras musculares al verse sometidas a la exigencia del esfuerzo inducido. Este daño muscular se puede medir de manera directa a través de biopsia muscular, siendo un proceso muy invasivo, doloroso y estresante, o resonancia magnética, una técnica que conlleva altos costes, la cual no tienen acceso la mayoría de los deportistas (Gibala, Mac Dougall, Tarnopolsky, Stauber, & Elorriaga, 1995). Como alternativa, existe un método indirecto y consiste en analizar la concentración en suero de diferentes marcadores de daño muscular (Paola Brancaccio et al., 2010), estrés oxidativo (Deminice, Sicchieri, Payao, & Jordao, 2010), inflamación (Monteiro et al., 2016) u hormonas (Ahtiainen, Pakarinen, Kraemer, & Häkkinen, 2003). Este proceso se basa en el hecho de que después de un esfuerzo físico hay una fuga de componentes musculares intracelulares, vertiéndose en el líquido extracelular como consecuencia de la ruptura de la membrana de la célula muscular (Brancaccio et al., 2010). De esta forma es posible cuantificar la exigencia del entrenamiento o competición, conociendo el esfuerzo que le ha supuesto al deportista, estudiar procesos de recuperación, detectar síndrome de sobreentrenamiento y controlar procesos de recuperación de lesiones (Brancaccio et al., 2006).

Aunque la extracción de sangre se considera un procedimiento eficaz y válido para explorar la respuesta de diferentes biomarcadores al ejercicio físico (Deminice

et al., 2010; Friden & Lieber, 2001; Hortobágyi & Denahan, 1989; Raeder et al., 2016), este método es doloroso, invasivo y lento. Recientemente, se ha descrito un procedimiento más funcional para medir la respuesta de biomarcadores en muestras de saliva (Barranco et al., 2017; Deminice et al., 2010; Papacosta & Nassiss, 2011; Tvarijonaviciute et al., 2017). Esto es posible ya que en las glándulas salivales tiene lugar el transporte de proteínas e iones de la sangre a la saliva, especialmente a través de los vasos sanguíneos que nutren estas glándulas. Este enlace podría representar el puente entre el sistema vascular y la cavidad oral (Haekel & Häneke, 1996). Las principales ventajas para medir las variables bioquímicas en la saliva son una mejor tolerancia al muestreo por parte de los participantes y que puede recolectarse simultáneamente en múltiples sujetos en condiciones de campo (Deminice et al., 2010). Varios estudios ya han reportado con éxito la respuesta hormonal en la saliva después de diferentes protocolos de entrenamiento (Beaven, Gill, & Cook, 2008; Hayes et al., 2010), pero sólo unos pocos estudios han examinado la respuesta al daño muscular (Barranco et al., 2017; Thorpe & Sunderland, 2012), estrés metabólico (Deminice et al., 2010; Gonzalez, Marquina, Rondon, Rodriguez Malaver, & Reyes, 2008) e inflamación (Minetto et al., 2005; Prokopchuk et al., 2007), lo que supone un campo de alto interés para la investigación en ciencias del deporte.

3.4.1.1.1. Estrés metabólico

El ácido úrico representa el antioxidante más frecuente en la saliva. La medición de este biomarcador cobra importancia debido a que un incremento de los niveles séricos tras el entrenamiento de fuerza implica que la musculatura ha sufrido un déficit temporal de las reservas de ATP. Este proceso se ve acompañado de una producción elevada de radicales libres por estrés, que hacen necesario un mayor tiempo de recuperación (Hellsten & Norman, 1993). Son pocos los estudios que reportan la respuesta de este biomarcador de estrés metabólico tras el entrenamiento de fuerza. Los investigadores Izquierdo et al. (2011) reportaron la respuesta de la activación muscular, y metabolitos en sangre tras un entrenamiento de extensión de rodilla consistente en 5 series de 10 repeticiones recuperando 2 min, antes y después de un programa de entrenamiento de fuerza de 7 semanas. En relación con el ácido úrico, los resultados postularon a este biomarcador como

un fiable indicador de fatiga por depleción del ATP muscular. Por otro lado, Gorostiaga et al. (2012) investigaron la respuesta de diferentes metabolitos tras dos protocolos de fuerza, 5 series de 10 repeticiones vs. 10 series de 5 repeticiones con la misma carga (10RM) recuperando 2 minutos en el ejercicio de extensión de rodilla. Esta diferencia en cuanto al carácter del esfuerzo produjo un incremento del 19% de los valores de ácido úrico respecto al pre, para el protocolo hasta el fallo (5x10) al final de la serie. Por el contrario, Pareja Blanco et al. (2014) no encontraron ningún incremento significativo de ácido úrico al concluir dos programas de entrenamiento de fuerza de 8 semanas: en uno de ellos se desplazaba la carga a la mitad de la velocidad posible y el otro tenía la directriz de mover carga a la mayor velocidad intencionada posible en el ejercicio de sentadilla.

Los estudios anteriores midieron el ácido úrico en sangre, pero existen otras investigaciones que han estudiado la respuesta de este biomarcador en saliva (Deminice et al., 2010; Gyurászová, Gurecká, & ..., 2020; Lindsay, Costello, & Lindsay, 2017). Esto se debe a que el ácido úrico es la molécula antioxidante más importante en la saliva, ya que contribuye alrededor del 70% de la capacidad oxidante de este fluido (Battino, Ferreiro, Gallardo, Newman, & Bullon, 2002). En un artículo de Deminice et al. (2010) el ácido úrico fue el único biomarcador que mostró un cambio significativo cuando se midió un panel de marcadores biológicos de estrés oxidativo en la saliva después de una sesión de ejercicio de fuerza, postulándolo como un indicador clave del estrés oxidativo. Por esta razón se crea la necesidad de seguir indagando en la respuesta de este biomarcador tras diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza.

3.4.1.1.2. Marcadores de daño muscular

El estudio de los marcadores de daño muscular tras el entrenamiento de fuerza es una herramienta bastante certera para valorar la fatiga que ha supuesto el entrenamiento desde una perspectiva aguda. Además, nos ayuda a evaluar el estado crónico del deportista con el fin de evitar el sobreentrenamiento y por consiguiente, reducir el riesgo de lesiones (Hartmann & Mester, 2000). Existe una gran cantidad de marcadores de daño muscular en suero que nos pueden aportar esta información, pero en ciencias del deporte los más usados son, posiblemente,

creatina quinasa (CK), lactato deshidrogenasa (LDH) y aspartato aminotransferasa (AST). Estas proteínas muestran un comportamiento bastante diferente antes y después del entrenamiento a nivel sérico. Los cambios van a depender de la intensidad, la recuperación, el estado del deportista y la duración del ejercicio. Por lo tanto, el monitoreo de CK, AST o LDH tras el entrenamiento de fuerza, se ha propuesto como un medio fiable para obtener información sobre el estado de la musculatura y la adaptación bioquímica a la carga física. Son muchos los estudios que han utilizado la concentración de estas proteínas musculares en suero para estimar el daño muscular inducido por diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza (Brancaccio, Maffulli, & Limongelli, 2007; Chen et al., 2019; Pareja Blanco et al., 2016). Además, se ha comprobado que el entrenamiento de fuerza acentuando la fase excéntrica, por lo general, produce más daño muscular que el entrenamiento donde se prioriza la fase concéntrica (Rathleff et al., 2013) y esto se ve reflejado en los niveles de CK.

Dependiendo del tipo de entrenamiento, los valores máximos de los marcadores de daño muscular en suero se han observado entre 24 y 96 horas después del ejercicio (Koch et al., 2014). Para el estudio de Jamurtas et al. (2000) estos autores, compararon la respuesta de CK en suero a las 24, 48 y 72 horas después de un entrenamiento pliométrico y otro excéntrico, donde reportaron los niveles más altos de CK después del entrenamiento excéntrico, llegando a los valores más altos a las 24 horas post entrenamiento. Sin embargo, Nosaka et al. (2002) mostraron valores de CK más altos después de las 96 horas tras un entrenamiento excéntrico, en comparación con las mediciones realizadas a las 24 y 48 horas post entrenamiento.

En lo que se refiere al entrenamiento de fuerza convencional, donde priorizamos el trabajo de la fase concéntrica, debemos tener en cuenta que la configuración de las series afectará al daño muscular inducido y a la orientación de las adaptaciones (Crewther, Keogh, Cronin, & Cook, 2006). Ya en la década de los 90, Kraemer y colaboradores (1993) estudiaron la respuesta de la CK al comparar entrenamientos de fuerza con varios ejercicios. Uno de ellos consistía en 5 series de 5 repeticiones con la carga del 5RM, frente a otro protocolo de 3 series de 10 repeticiones llegando al fallo muscular, ambos con recuperación de 2 minutos. Comprobando cómo el pico máximo de esta proteína se alcanzó a las 24 horas

para el entrenamiento de 3x10. Respaldo lo anterior, Draganidis et al. (2013) reportaron que los valores máximos de la CK se alcanzaron entre las 24-48h post entrenamiento para dos protocolos de entrenamiento de fuerza de mayor (4 series de 4-6 repeticiones al 85-90% 1RM) y menor intensidad (4 series de 8-10 repeticiones al 65-70%RM) en futbolistas proponiendo que es necesario una recuperación de al menos 24h para la siguiente sesión de entrenamiento.

Por otro lado, Pareja Blanco et al. (2016) compararon la respuesta aguda de dos protocolos de entrenamiento de fuerza en sentadilla y press de banca. Uno de los protocolos consistió en 3 series de 6 repeticiones con el peso del 12RM (mitad del carácter del esfuerzo), mientras que el otro fue diseñado con 3 series de 12 repeticiones con el peso del 12RM (carácter del esfuerzo máximo). Este segundo protocolo no solo presentaba un mayor esfuerzo, sino que se realizaron el doble de repeticiones. Los resultados obtenidos reportaron en relación con la concentración de CK en sangre, el pico de esta proteína a las 48h para el protocolo hasta el fallo (3x12), acompañado de un gran decremento en la velocidad de ejecución y reducción de altura de salto y variabilidad de frecuencia cardiaca. A pesar de la importancia que tiene el estudio de la CK tras el entrenamiento de fuerza, no existen publicaciones que muestren los valores de diferentes biomarcadores de daño muscular en saliva tras el entrenamiento de fuerza. En otras disciplinas deportiva, destaca el trabajo de Barranco et al. (2017) donde estudiaron el comportamiento de la CK, AST y LDH tras un partido de fútbol sala. Reportaron un aumento significativo para la CK a las 12h post partido y de LDH a los 30 minutos del final del encuentro.

En base a la literatura consultada, se hace atractivo el estudio de estos biomarcadores de daño muscular tanto en sangre como en saliva, tras diferentes configuraciones de la serie. Existen pocas publicaciones científicas que utilicen la saliva como herramienta para medir el daño muscular en el deporte y la posibilidad de hacerlo tras el entrenamiento de fuerza se postula como una propuesta de investigación muy interesante.

3.4.2. Indicadores Mecánicos de Fatiga

La fatiga o reducción de la capacidad de aplicar fuerza durante el entrenamiento se puede medir o cuantificar usando diferentes métodos mecánicos de evaluación. Estos se caracterizan por interpretar un descenso del rendimiento a través de variables mecánicas como el salto o la velocidad de ejecución, que, al medirse durante la sesión de entrenamiento, nos pueden aportar un feedback inmediato del estado del deportista (Jiménez Reyes & González Badillo, 2011; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). La medición de la fatiga neuromuscular a partir de este tipo de pruebas, es muy práctica debido a la simplicidad del ejercicio y el coste asequible de los dispositivos de medición, facilitando la posibilidad de evaluación de la fatiga a los entrenadores.

3.4.2.1. Contracción Isométrica máxima

La reducción de la fuerza generada durante una contracción isométrica máxima (maximal voluntary contraction MVC) representa para algunos autores (Carroll et al., 2016; Gandevia, 2001; Prasartwuth, Taylor, & Gandevia, 2005) la demostración más directa de la fatiga. Siguiendo esta premisa, son muchas las investigaciones que, para determinar la fatiga producida tras el entrenamiento de fuerza en el miembro inferior, se lleva a cabo la medición de la MVC durante contracciones isométricas máximas de los extensores de rodilla, ya que representan la musculatura más determinante en estos movimientos (Boccia et al., 2017; Giandolini et al., 2016; Marquez et al., 2016). Con un test en el que se mida la fuerza isométrica máxima, es posible evaluar el pico máximo de fuerza, la fuerza explosiva máxima y la fuerza explosiva en régimen isométrico durante cualquier punto temporal que haya sido medida. Este método consiste en realizar una activación muscular voluntaria máxima ante una resistencia inamovible y que permita el registro de la fuerza generada. Los dispositivos más comunes son la galga y la plataforma de fuerzas, ya que permiten registrar valores de aplicación de fuerza en cuanto al tiempo. Pudiendo determinar de esta forma el ratio de fuerza por unidad de tiempo (rate of force development, RFD) (Mc Lellan et al., 2011). Por ello, no sólo se puede conocer como afecta la fatiga a la cantidad de fuerza aplicada, sino también a la calidad de esta, ya que recordamos que para la mayoría de los deportes es

indispensable aplicar gran cantidad de fuerza en poco tiempo. Además, a través de este método de evaluación se suele determinar la fatiga central y periférica al implementar la TIT (Boccia et al., 2017; Giandolini et al., 2016; Marquez et al., 2016).

3.4.2.2. *Pérdida de velocidad de ejecución*

En apartados anteriores se ha mencionado la posibilidad que ofrece la velocidad de ejecución como indicador de la intensidad en el entrenamiento de fuerza, además de la medición del porcentaje de pérdida de velocidad. Esta variable se ha usado en la última década como el mejor indicador de intensidad durante el entrenamiento de fuerza (Mora Custodio, Rodríguez Rosell, Pareja Blanco, Yañez García, & González Badillo, 2016; Morán Navarro et al., 2019; Pareja Blanco, Villalba Fernández, Cornejo Daza, Sánchez Valdepeñas, & González Badillo, 2019; Pérez Castilla et al., 2019; Sánchez Moreno et al., 2017; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Los autores Sánchez Medina y González Badillo reportaron relaciones en diferentes porcentajes de pérdida de velocidad con marcadores metabólicos (lactato y amonio) demostrando que existe una alta correlación entre ambas variables. Lo que postula a la pérdida de velocidad de ejecución como un indicador fiable de fatiga neuromuscular. Además, esto permite controlar la intensidad del ejercicio teniendo en cuenta la pérdida de velocidad de ejecución dentro de cada serie. De esta forma se pueden programar entrenamientos en base a un porcentaje de pérdida de velocidad y no en cuanto a número de repeticiones. Se ha demostrado que la pérdida de velocidad condiciona las adaptaciones conseguidas. En el estudio de Pareja Blanco et al. (2016) muestran que un programa de entrenamiento que experimenta una pérdida de velocidad del 20% en cada serie, produce mejoras en cuanto al rendimiento (en altura de salto, tiempo de sprint y niveles de fuerza) mientras que a través de una pérdida de velocidad del 40% se consigue mayores niveles de hipertrofia.

Por otro lado, también los autores Pareja Blanco et al. (2017) estudiaron las adaptaciones conseguidas al comparar una pérdida de velocidad de ejecución en la serie de un 15% frente a un 30% en sentadilla con futbolistas durante un periodo de 6 semanas. El entrenamiento con una pérdida menor de velocidad (15%) indujo mayores niveles en cuanto a ganancia de fuerza y altura de salto. Demostrando así

una tendencia a lograr ganancias de fuerza similares o incluso mejores cuando el volumen acumulado dentro de las series es menor.

Respaldando la idea anterior, Galiano et al. (2020) compararon el efecto de dos protocolos de entrenamiento de fuerza en sentadilla durante 14 sesiones repartidas en 7 semanas. Uno de los protocolos alcanzaba una pérdida de velocidad de ejecución del 5%, mientras que el otro llegaba a un 20% de pérdida de velocidad. Ambos grupos obtuvieron mejoras significativas en cuanto a ganancias de fuerza, reducción del tiempo de sprint en 20 m y ganancia de altura salto. Con la diferencia de que grupo que sufría una pérdida del 5%, únicamente realizaba el 32,6% de las repeticiones que completó el otro protocolo. Por lo tanto, se propone una pérdida de velocidad más pequeña, o, en otras palabras, menos repeticiones a mayores velocidades como una propuesta eficaz para la mejora del rendimiento a través del entrenamiento de fuerza. En una línea similar, Pérez Castilla et al. (2018) estudiaron el efecto de la pérdida de velocidad entre dos protocolos, uno con una pérdida del 10% y otro de un 20%. Para ello evaluaron la relación fuerza velocidad con saltos progresivos con carga, la velocidad de ejecución durante cada serie y el rendimiento en un sprint de 15m. Finalmente, comprobaron cómo estos dos protocolos no experimentaron diferencias significativas en cuanto al rendimiento.

Además, el interés de la pérdida de velocidad durante el entrenamiento de fuerza también ha sido evaluado en protocolos con recuperación entre repeticiones o Cluster. García Ramos et al. (2015) compararon la pérdida de velocidad sufrida durante tres protocolos de fuerza en press de banca (tradicional, IRR 6 segundos e IRR 12 segundos) a lo largo de 3 series de 15 repeticiones. Los resultados de este estudio proponen que introducir tiempo de recuperación entre repeticiones, permite realizar un mayor número de repeticiones sin que experimenten un descenso significativo en cuanto a la pérdida de velocidad. Por otro lado, García Ramos et al. (2020) estudiaron los efectos de la pérdida de velocidad y el daño metabólico producido tras diferentes configuraciones de la serie tradicional y Cluster. Las configuraciones de las series estudiadas fueron dos protocolos tradicionales de repeticiones continuas, uno hasta el fallo (TR1: 3x10) y otro con la mitad del carácter del esfuerzo (TR2: 6x5) y tres protocolos Cluster (CL1: 3x10[5s], CL2: 3x10[10s] y CL3: 3x10[15s]), unificando el número de repeticiones (30) con

la misma carga (10RM), y el mismo tiempo de recuperación entre series (5 min). Los resultados de esta investigación reportaron que los protocolos TR2, CL1 y CL2 únicamente experimentaron entre un 10-13% de pérdida de velocidad entre series, lo que permite un mejor rendimiento durante la sesión de entrenamiento de fuerza.

Es necesario entender que la pérdida de velocidad no se comporta de la misma manera en todos los ejercicios. Debido a que cada ejercicio tiene una velocidad de ejecución diferente en su RM, el comportamiento de la velocidad ante cargas submáximas también es diferente. Bajo esta idea, Izquierdo et al. (2006) observaron un descenso mayor tras cada repetición para el ejercicio de press de banca que para el ejercicio de media sentadilla, seguramente referido a la implicación muscular.

3.4.2.3. *Pérdida de altura de el Salto*

El salto vertical es uno de los test más usados para la medición indirecta de la fuerza y potencia de los músculos extensores de las piernas. (Bosco, Luhtanen, & Komi, 1983). El salto con contramovimiento (countermovement jump CMJ) quizás es el más popular por la fiabilidad y validez de su ejecución. Se traduce en un indicador de la capacidad reflejo elástica explosiva de las piernas, discriminando la acción de los brazos al realizarse con las manos fijas en la cadera. Este test ha sido comúnmente elegido para valorar la fatiga, al comparar la pérdida de la altura de salto pre y post series o del entrenamiento de fuerza, (Sánchez Medina & González Badillo, 2011) e incluso tras el esprint, ya que este esfuerzo se basa en la aplicación de fuerza durante cada apoyo y se ha demostrado que representan niveles de fatiga similares a ejercicios de fuerza como sentadilla (Jimenez Reyes et al., 2016).

Ya antes del año 2000, Smilios (1998) demostró cómo al variar la intensidad del entrenamiento de fuerza afectaba a la altura de salto. Comparó entrenamientos de extensión de piernas con el 50, 70 y 90% del 1RM hasta la extenuación, mostrando que el protocolo con el 70% del RM produjo un descenso del 33% en la altura de salto. Este valor es muy elevado en comparación con lo reportado por investigaciones más novedosas. Pero hay que tener en cuenta que en esta época no se podía medir la velocidad de ejecución para controlar realmente la intensidad de la carga utilizada.

La primera investigación que muestra la relación entre la pérdida de salto con la pérdida de velocidad de ejecución y la acumulación de metabolitos fue diseñada por Sánchez Medina & González Badillo (2011). Este estudio acercó a los entrenadores una forma práctica de cuantificar la fatiga, puesto que se propone al CMJ como indicador válido de fatiga neuromuscular. Pudiendo relacionar esta variable con la pérdida de velocidad y comprobando cómo existe una alta correlación entre ambas. Los investigadores Párraga et al. (2018) evaluaron entre otras variables, la altura de salto CMJ tras un entrenamiento de fuerza al fallo en sentadillas y su comportamiento a las 24 y 48h. Comprobando que incluso tras estos dos días de recuperación, aún prevalece la fatiga, comprometiendo la altura de salto. Por otro lado, Pareja Blanco et al (2014) comprobó cómo entrenar durante 6 semanas en sentadilla con la máxima velocidad intencionada produjo aumento significativo en la altura de salto frente a entrenar con la mitad de la velocidad posible durante un protocolo de 3 series de 8 repeticiones con el 60%RM. Esto determina a la altura de salto no solo como un indicador de fatiga si no también como un indicador de rendimiento.

3.4.2.4. Velocidad de 1m/s en sentadilla y Press Banca

El desplazamiento de la carga ante una misma carga ha sido otra propuesta utilizada comúnmente por diversos investigadores para cuantificar la fatiga del entrenamiento. Durante el calentamiento o activación, se determina la carga a la que el deportista es capaz de mover a una velocidad de 1m/s. Esta carga se usará también al finalizar la serie o el entrenamiento para ser desplazada y comprobar la similitud de velocidad respecto al pre. Un descenso en la velocidad de ejecución ante esta carga, indica una pérdida del rendimiento debido a la fatiga ocasionada. La razón por la que se usa esta medida es que representa una velocidad suficientemente alta, que se alcanza con cargas medias (~ 47% 1RM en press de banca y ~ 60% 1RM en sentadilla), permitiendo así una buena expresión del efecto de la fatiga en la velocidad, además de ser relativamente fácil de realizar y rápido de determinar como parte del calentamiento (Gonzalez Badillo et al., 2016).

Los autores Sánchez Medina & González Badillo (2011) fueron los pioneros en implementar este modelo de medición de fatiga, relacionándolos con otros

marcadores mecánicos como la pérdida de velocidad y la altura de salto y de marcadores metabólicos como el lactato y el amonio. Además, comprobaron que la pérdida relativa de velocidad con la carga de 1m/s fue de menor magnitud que la pérdida de velocidad al finalizar las series. Por otro lado, al comparar los ejercicios de press de banca y sentadilla, reportaron una pérdida mayor durante el ejercicio de press de banca en comparación con sentadilla, quizás debido a que el press de banca implica un grupo muscular más pequeño y se ve más afectado por la fatiga.

3.4.2.5. *Relación Fuerza – Velocidad*

Otro método utilizado para evaluar la fatiga es la comparación pre-post de la relación F-V ante diferentes cargas, estudiando los cambios en las capacidades máximas de los músculos para producir fuerza (F0), velocidad (V0) y potencia (Pmax) (García Ramos et al., 2018; Garcia Ramos, Pérez Castilla, & Jaric, 2018; Garcia Ramos & Jaric, 2018). Es por ello por lo que el press de banca lanzado únicamente con la barra (peso de la barra 20kg) y con sobrecarga (70-80% RM) son usados para la valoración de la fatiga en la musculatura implicada en las acciones de empuje del miembro superior, mientras que saltos CMJ sin carga y con carga (la que permita saltar entorno a 12 cm, para asegurar que es una carga alta) son usados para la evaluación de la capacidad de empuje del miembro inferior a través del método de dos puntos propuesto por García Ramos & Jaric (2018). De esta forma, al elegir una carga baja y otra alta no es necesario fatigar al deportista con numerosos intentos o con diferentes cargas intermedias, lo que facilita la medición.

En el estudio de García Ramos et al. (2018) estudiaron la fiabilidad de este método de relación F-V para cuantificar la fatiga. Para ello, propusieron cinco protocolos de entrenamiento de fuerza, uno sin fatiga, dos hasta el fallo y otros dos hasta el no fallo con el 60 y el 80%RM en Press de Banca, comprobando que es fiable utilizar este método para medir el efecto de la fatiga sobre la capacidad del deportista para aplicar fuerza, velocidad y potencia sobre una carga determinada.

Por otro lado, los autores Torrejón et al. (2019) investigaron la relación FV tras tres entrenamientos de fuerza en Press de Banca: uno tradicional (6 series de 4 repeticiones recuperando 3 minutos) otro Cluster (6 series de 4 repeticiones

recuperando 15 segundos entre cada 2 repeticiones y 2 min 45 segundos entre cada serie) y un protocolo de recuperación entre repeticiones IRR (1 serie de 24 repeticiones recuperando 39 segundos entre cada una de ellas). Estos tres protocolos usaban la misma carga correspondiente a 6RM, además, estaban igualados en cuanto a volumen y tiempo de recuperación, pero con configuraciones diferentes. Los resultados de esta investigación relevaron que no existieron diferencias significativas entre las variables de fuerza, velocidad y potencia al acabar cada entrenamiento, por lo que al igualar la relación trabajo-descanso aún con recuperaciones cortas entre repeticiones, no se consiguen alcanzar velocidades de trabajo más altas, quizás debido a que la carga de entrenamiento utilizada para este estudio no ha sido sumamente elevada.

3.4.3. Indicadores Metabólicos de fatiga

A medida que aparece la fatiga durante el entrenamiento de fuerza se desencadenan efectos que alteran no sólo factores mecánicos como los mencionados en el apartado anterior, también metabólicos, afectando a la musculatura implicada y por consiguiente, produciendo un decremento del rendimiento (Gorostiaga et al., 2014).

Se conoce que el adenosín trifostato (ATP) es la molécula encargada de producir energía (Chicharro & Mojares, 2008). Durante un ejercicio de alta intensidad, la capacidad de producción anaeróbica de ATP a partir de la fosfocreatina (PCr) y de la degradación de glucógeno, principalmente en fibras tipo II, va decayendo, produciendo un descenso en la producción de fuerza y potencia (Karatzafiri, De Haan, Ferguson, Van Mechelen, & Sargeant, 2001). Este proceso lleva asociado un aumento de la concentración de Pi y H⁺ y alteraciones en la liberación y captación del Ca²⁺. Durante los ejercicios de alta demanda de energía, la concentración de ATP permanece inicialmente casi constante mientras que la PCr se descompone en creatina (Cr) y posfato inorgánico (Pi). Mientras que la Cr tiene poco efecto sobre la función contráctil (Murphy, Stephenson, & Lamb, 2004), el Pi puede causar una notable disminución de la producción de fuerza miofibrilar y de la sensibilidad Ca²⁺, así como la liberación de Ca²⁺ en el retículo sarcoplasmático. En consecuencia, se puede entender que el aumento de Pi es una causa importante de fatiga (Håkan

Westerblad, Allen, & Lännergren, 2002), deteriorando la función neuromuscular (Allen et al., 2008).

Por otro lado, quizás por su facilidad para ser medido, uno de los metabolito más estudiado en el entrenamiento de fuerza es el lactato, ya que representa un indicador indirecto de la acidosis muscular y es el resultado derivado de la contracción muscular (Tran et al., 2006). Esto es debido a que, durante un entrenamiento de fuerza, la mayor obtención de energía es a partir del metabolismo anaeróbico de la vía glucolítica (Balsalobre Fernández & Jimenez Reyes, 2014). Como consecuencia de este proceso, se produce una acumulación de lactato e hidrogeniones (H^+) y un descenso rápido de la fosfocreatina en consecuencia de la hidrólisis del ATP produciendo H^+ para obtener energía en situaciones de anaerobiosis. Esto desencadena un declive en el rendimiento físico, ya que, se ha demostrado que la acidosis intramuscular como consecuencia de la acumulación de hidrogeniones se relaciona con la reducción de la capacidad de generar fuerza, potencia y la velocidad de acortamiento de fibras musculares *in vitro* (Cady, Elshove, Jones, & Moll, 1989).

El punto de vista tradicional promulga que la producción de lactato también está asociada con la producción de iones H^+ , lo que causa una reducción en el pH del ambiente intramuscular. En pocas palabras, esta visión establece que la producción de lactato es una causa de acidosis. Sin embargo, esta idea ha sido cuestionada por numerosos investigadores que afirman que el lactato no está involucrado en la producción de H^+ (y viceversa) (Phillips, 2015). El incremento del lactato en sangre ha demostrado tener una estrecha relación con la fatiga producida (Cairns, Knicker, Thompson, & Sjogaard, 2005; Gorostiaga et al., 2014). Aunque no existe una explicación clara de causa-efecto, históricamente se ha entendido al lactato como el responsable de la fatiga, pero las últimas investigaciones defienden que el lactato consume la producción de H^+ , reduciendo la acidez del músculo. Se han detectado mayores cantidades de lactato durante los períodos de trabajo de alta intensidad, cuando también se puede observar una disminución del rendimiento (Balsalobre Fernández & Jimenez Reyes, 2014). Sin embargo, la producción de lactato es alta debido a su papel en el tamponamiento del exceso de piruvato y H^+ , y no está afectando negativamente sobre el rendimiento. Por lo tanto, el aumento de la

producción de lactato es el resultado del intento del cuerpo de prevenir aumentos en la acidez intramuscular y su aparición en la fatiga es una coincidencia (Brooks, 2001; Phillips, 2015). Estas nuevas teorías postulan al lactato como nuestro aliado para la mejora del rendimiento y no como el inductor de fatiga que se tenía creído (Hall, Rajasekaran, Thomsen, & Peterson, 2016). Además, se ha demostrado que el lactato es una fuente de combustible durante y después del ejercicio. Aproximadamente el 75% de todo el lactato producido durante el ejercicio se usa como combustible muscular (George A. Brooks, 2007). Una demostración clara se expone en el artículo de Ingham et al. (2008) donde averiguaron que hasta el 25% de la energía necesaria durante una carrera de 1.500 metros es suministrada por lactato.

En el estudio de Sánchez Medina y González Badillo (2011) se relaciona diferentes variables mecánicas con la acumulación de lactato y amonio como indicadores metabólicos de fatiga, donde se pudo comprobar un incremento del lactato y amonio a medida que crecía la pérdida de velocidad de ejecución en la serie. Esta investigación consigue determinar una estrecha correlación entre todas estas variables, acercando a los entrenadores la posibilidad de mediar la fatiga a partir de marcadores mecánico en vez del análisis de metabolitos en sangre, ya que son pruebas de laboratorio con difícil acceso y algo más costosas.

Durante el entrenamiento de fuerza en el que se completan repeticiones cercanas al fallo y se produce una pérdida de velocidad alrededor del 40% se han observado concentraciones de lactato en torno a 12 mmol/L. Por otro lado, tras estudiar el efecto de otros diseños de entrenamientos en donde únicamente se llegan a realizar la mitad de repeticiones posible, los valores de lactatemia no superan los 5 mmoles/L (Gorostiaga et al., 2012; Pareja Blanco et al., 2014). Esto sugiere que el tiempo necesario de recuperación entre series para completar el entrenamiento con repeticiones hasta el fallo debe ser mayor y, por consiguiente, el tiempo necesario de recuperación tras la sesión de fuerza hasta el fallo debe ser algo mayor que en entrenamientos hasta el no fallo (Pareja Blanco et al., 2014; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Esto sin duda representa una de las mayores preocupaciones por parte de los entrenadores, y existen pocas evidencias científicas que reporten el tiempo necesario de recuperación tras diferentes entrenamientos de fuerza.

Como hemos visto, el trabajo de fuerza exige una gran implicación del metabolismo glucolítico, y se ha demostrado que una elevación de los niveles de lactato en sangre es concomitante con una reducción en el rendimiento. Sin embargo, se supone que romper las series en pequeños grupos de repeticiones inhibe los efectos de la acumulación metabólica y el agotamiento de sustratos energéticos (Haff et al., 2008; Mora Custodio et al., 2018). Esto ha sido una de las bases teóricas que respalda en entrenamiento Cluster o IRR. En el estudio de Iglesias Soler et al. (2012) analizaron el efecto de realizar dos protocolos de entrenamiento de fuerza en sentadilla: repeticiones continuas hasta el fallo (3 series de 4 repeticiones recuperando 3 minutos) vs distribución con recuperación entre repeticiones (3 series de 4 repeticiones recuperando 180 segundos entre repeticiones). Observaron que el protocolo de entrenamiento de repeticiones continuas producía un descenso mayor de la velocidad de ejecución al final del entrenamiento y un aumento considerable de la concentración de lactato en relación con el entrenamiento con recuperación entre repeticiones, lo que posiciona al entrenamiento IRR como un protocolo válido para preservar velocidades de ejecución altas y acumular bajos niveles de lactato. Como ejemplo de entrenamiento Cluster con recuperación entre bloque de repeticiones, Girman et al. (2014) estudiaron el efecto de dos protocolos de entrenamiento en sentadilla y cargada: uno de ellos tradicional donde se realizaron 4 series de 6 repeticiones recuperando 2 minutos y otro Cluster con recuperación de 15 segundos a la mitad de las repeticiones. Se reportaron una mayor concentración de lactato y peor rendimiento en Salto vertical y horizontal para el protocolo tradicional inmediatamente después y a los 15 y 30 minutos post entrenamiento. Por otro lado, García Ramos et al. (2020) comprobaron cómo el entrenamiento de fuerza en press de banca con recuperación entre repeticiones de 10 y 15 segundos producía una acumulación significativamente menor de lactato en comparación con los protocolos de fuerza tradicionales de repeticiones continuas hasta el fallo y con la mitad del carácter del esfuerzo.

IV

Formulación del problema

IV/ FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Tras estudiar la literatura existente, nos encontramos con una falta de conocimiento que incita a indagar sobre ella, y abordar una línea de investigación que amplíe los conocimientos disponibles. La justificación de la formulación del problema surge al percatarnos de lo siguiente:

Son muchas las posibilidades que nos ofrece variar la configuración de la serie durante el entrenamiento de fuerza (variar tiempo de recuperación, llegar al fallo o no, recuperar entre repeticiones etc). Esto hace complicado el estudio de los efectos ocasionados, siendo limitada la actuación en cada estudio. Por lo tanto, experimentar con diferentes configuraciones y estudiar diversos efectos la configuración de las series nos podrá proporcionar respuestas interesantes para diseñar de forma optimizada diferentes programas de entrenamiento de fuerza.

El tipo de entrenamiento con recuperaciones entre repeticiones Cluster o IRR está en auge y a diferencia de los estudios que abordan efectos agudos, existen pocos que contemplen los efectos de estos programas de entrenamiento, lo que significa que la problemática de estudio existe y se puede abordar este estudio.

El uso de la saliva para la determinación del efecto del entrenamiento es poco usado en ciencias del deporte y mucho más usual encontrarlo en el campo de la medicina con fines clínicos para la detección de diversa enfermedades coronarias, hepáticas o bucales. Las ventajas frente a la sangre para obtener estas muestras proponen a la saliva una herramienta atractiva para la determinación de diferentes biomarcadores que nos puedan aportar información acerca del efecto producido por el entrenamiento y del estado de recuperación del deportista, lo que nos sugiere que el conocimiento disponible no es suficiente y se puede abordar una línea de investigación que determine las posibilidades que ofrece esta metodología.

Son muchos los estudios que han diseñado protocolos de entrenamiento de fuerza con el fin de evaluar el daño muscular y la pérdida de rendimiento como

indicador de fatiga. Pero son pocas las investigaciones que valoran los efectos agudos y tardíos sobre la fatiga central y periférica ocasionada tras diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza.

Por lo tanto, en la búsqueda de propuestas que nos permitan indagar en los efectos de diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza y en la aplicación de diversos métodos de cuantificación de la fatiga, nos planteamos los siguientes interrogantes:

- ¿Qué ventajas o desventajas puede suponer entrenar de forma Cluster frente al método tradicional?
- ¿Qué tipo de biomarcadores son válidos en saliva para determinar el efecto inducido por el entrenamiento de fuerza? ¿Y qué procedimiento de medición y análisis es más efectivo?
- ¿Existe alguna asociación entre la respuesta aguda y tardía de los marcadores de daño muscular tras el entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado?
- ¿Cuánto tiempo de recuperación, entre series y entre repeticiones, optimiza el rendimiento en una sesión de entrenamiento de fuerza?
- ¿Qué efectos produce variar el carácter del esfuerzo, el tiempo de recuperación y el número de repeticiones a nivel perceptual, mecánico, metabólico, bioquímico y neural?
- ¿Cómo evoluciona la fatiga central y periférica desde inmediatamente después hasta días siguientes tras dos protocolos diferentes de fuerza?



Objetivos e hipótesis

V/ OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Con el propósito de dar respuestas a las preguntas propuestas en el apartado anterior, nos surge la inquietud de desarrollar una línea de investigación que persigue abordar los siguientes objetivos e hipótesis a partir de cinco estudios diferentes.

■ Estudio I

Objetivo

Comparar las respuestas mecánicas (pérdida de velocidad y altura de salto), metabólicas (lactato) y perceptivas (percepción subjetiva del esfuerzo) entre diferentes configuraciones de las series en el ejercicio de sentadilla con una carga de 10RM. Se han diseñado dos protocolos tradicionales de repeticiones continuas (TR1:3x10 y TR2: 6x5) y cuatro protocolos Cluster con recuperación entre repeticiones (CL1: 3x10[10], CL2: 3x10[15], CL3: 3x10[30] y CL4: 30 [15]).

Hipótesis

Nuestra primera hipótesis es que todas las configuraciones de la serie en Clúster inducirán una menor fatiga mecánica, metabólica y perceptiva que las configuraciones de las series tradicionales basadas en repeticiones continuas ya al disponer de mayor tiempo de recuperación (Haff et al., 2008).

■ Estudio II

Objetivo

Estudiar la relación entre la sangre y la saliva para la determinación del stress metabólico ocasionado tras dos protocolos de entrenamiento de fuerza en sentadilla, uno agotando todas las repeticiones posibles (6x10) y otro realizando la mitad de las repeticiones posibles (6x5). Evaluando cómo dos condiciones de muestreo diferentes en saliva (Flujo pasivo o Salivette con algodón) y tres procedimientos de normalización diferentes (sin ninguna corrección, corregida por el flujo salival

o corregida por la concentración de proteína total) podrían influir en la medición valores de ácido úrico en saliva.

Hipótesis

Nuestra segunda hipótesis es que la saliva puede ser útil para la medición del estés metabólico tras diferentes entrenamientos de fuerza, a través de la medición del ácido úrico (Deminice et al., 2010).

■ **Estudio III**

Objetivos

(I) Comparar el efecto de varios intervalos de descanso diferente entre series (1, 3 y 5 minutos) sobre la velocidad de ejecución durante una sesión de entrenamiento de fuerza (3 series de 5 repeticiones con la carga del 10RM) para los ejercicios de sentadillas y press de banca. (II) Explorar la fatiga inducida tras cada sesión de entrenamiento de fuerza con las tres propuestas de tiempo de descanso entre series (1,3 y 5min) en la relación F-v de los músculos del miembro inferior y superior del cuerpo.

Hipótesis

(I) Suponemos que las velocidades de ejecución más lentas y rápidas se observarán en los protocolos con los intervalos de descanso entre series de 1 y 5 minutos respectivamente. (II) Todas las sesiones de entrenamiento de fuerza, independientemente del intervalo de descanso entre series, tendrían un impacto negativo en la relación Fv de los músculos tanto del miembro inferior como superior del cuerpo (es decir, valores más bajos de F_0 , v_0 y P_{max}), pero los mayores efectos negativos se producirían como resultado de intervalos de descanso más cortos entre series.

■ **Estudio IV**

Objetivos

(I) Examinar las respuestas agudas (tras 24h) y tardías (tras 96h) para la CK, AST y LDH como biomarcadores de daño muscular en sangre tras un entrenamiento

excéntrico acentuado de fuerza en sentadillas (8 series de 10 repeticiones con el 120%RM y fase excéntrica de 3 segundos). (II) Comparar estos resultados en sangre con la respuesta en saliva.

Hipótesis

(I) Hipotetizamos que la concentración de estos biomarcadores de daño muscular será significativamente mayor en a las 24 y 96h en comparación con el pre y (II) estas enzimas mostrarán cambios similares en suero y saliva tras el entrenamiento.

■ **Estudio V**

Objetivos

El objetivo principal del presente estudio fue comparar el efecto agudo (después de cada serie de entrenamiento) y retardado (1, 24 y 48 horas después del entrenamiento) de dos protocolos de fuerza en sentadilla al fallo (6 series e 10 repeticiones) y no fallo (6 series de 5 repeticiones) sobre la fatiga periférica y central. El objetivo secundario era relacionar los cambios en la función neuromuscular con el rendimiento mecánico (fuerza isométrica máxima) y el daño muscular (CK y AST)

Hipótesis

Es posible hipotetizar que la configuración de entrenamiento de fuerza al fallo producirá mayores niveles de fatiga central y periférica, además de daño muscular que el entrenamiento hasta el no fallo. Ocasionando, además, que la respuesta tardía, relacionada con la recuperación de la función neuromuscular y el daño muscular también sea diferente.

VI

Metodología

VI/ METODOLOGÍA

Para conseguir los objetivos planteados en esta tesis hemos diseñado cinco estudios diferentes. Estos se basan en la formulación del problema descrito a partir de las necesidades encontradas en la literatura. La siguiente tabla muestra un resumen del diseño metodológico llevado a cabo en cada una de las investigaciones que dieron lugar a las cinco publicaciones de esta tesis.

Tabla 1: Resumen metodológico en cada estudio

	Ejercicios	Protocolos	Pre Test	Post Test	Material
Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat					
ESTUDIO I Fig 4	Sentadilla en Smith Machine	TR1-Tradicional 1:3x10 TR2-Tradicional 2 :6x5 CL1-Cluster1: 3x10 [10-s] CL2-Cluster 2: 3x10 [15-s] CL3-Cluster 3: 3x10 [30-s] CL4-Cluster 4: 1x30 [15-s] Carga 75%10RM	Altura CMJ Lactato RPE	Medición de VMP durante todas las repeticiones Tras cada Serie: Altura CMJ Lactato RPE	Smith Machine Encoder Lineal Plataforma de contacto Escala OMNI Analizador de Lactato
Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow, and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva					
ESTUDIO II Fig 5	Sentadilla en Peso Libre	Fallo: 6x10 No Fallo 6x5 Rec 5 min Carga 75%10RM	Saliva: Salivette Algodón y Flujo Pasivo Suero	Post 60 min 24 y 48h Saliva Algodón y Flujo Pasivo Suero	Pórtico Peso libre Salivettes Tubos Falcon Vacutainers Kit Comercial de Colorimetría
Effect of different interser rest intervals on mean velocity during the squat and bench press exercises					
ESTUDIO III Fig 6	Sentadilla Press de Banca En Smith Machine	REC1: 3X5 rec 1' REC2: 3X5 rec 3' REC3: 3X5 rec 5' Carga 75%10RM	Perfil Fv: CMJ con Carga Press Banca Lanzado	Medición de la VMP durante todas las repeticiones Perfil Fv con CMJ con Carga y Press Banca Lanzado al acabar la sesión	Smith Machine Encoder Lineal My Jump app con iPhone 8

Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol					
ESTUDIO IV Fig 7	Sentadilla en Peso Libre	8x 10 con 3" Ecc Carga 120%RM	Saliva por Flujo Pasivo Suero	Post 24 y 96h Saliva por Flujo Pasivo Suero	Smith Machine Tubos Falcon Vacutainers
Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue					
ESTUDIO V Fig 8	Sentadilla	Fallo: 6x10 No Fallo 6x5 Rec 5 min Carga 75%10RM	Suero Twitch Interpolation Technique	Medición de VMP durante todas las repeticiones. Pérdida de velocidad entre series Post 1h 24h y 48h Suero Twitch Interpolation Technique	órtico Peso Libre Estimulador eléctrico Galga de fuerza Silla Inmovilización Vacutainer Encoder lineal

6.1. SUJETOS

Los sujetos que tomaron parte de los diferentes estudios que conforman esta tesis doctoral fueron estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Todos ellos tenían mínimo un año de experiencia con los ejercicios evaluados, pero aún así, participaron en un periodo de entre 2 y 3 semanas de familiarización con los ejercicios y las técnicas de evaluación. Todos estos participantes aseguraban no haber tenido lesiones en los seis meses previos que pudieran dificultar la participación en el estudio, además de asegurar que no consumían ni ayudas ergogénicas ni drogas que pudieran alterar las mediciones. Todos los sujetos fueron informados de los posibles riesgos asociados a las intervenciones y firmaron un consentimiento informado (Adjunto en Anexos) al principio de cada estudio. Los protocolos experimentales fueron aprobados por el comité ético local de la Universidad Católica de San Antonio (Murcia) de acuerdo con la Declaración de Helsinki. A continuación, se detalla la descripción de los sujetos que participaron en cada estudio

Tabla 2: Descripción de los sujetos que han participado en cada estudio

Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat	
ESTUDIO I Fig 4	n=11 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD]; edad 23.3 ± 2.0 años, peso 79.3 ± 5.5 kg y altura 178.8 ± 4.7 cm)
Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow, and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva	
ESTUDIO II Fig 5	n= 12 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD]; edad 23.5 ± 3.5 años, peso 73± 7.2 kg y altura 177 ± 10.1 cm)
Effect of different interset rest intervals on mean velocity during the squat and bench press exercises	
ESTUDIO III Fig 6	n= 15 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD]; edad= 20.3 ± 3.3 años, peso = 72.1 ± 8.3 kg, altura= 173 ± 4.2 cm, SQ 10RM = 63.2 ± 11.7 kg, y BP 10RM = 47.3 ± 16.5 kg)
Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol	
ESTUDIO IV Fig 7	n=16 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD]; hombres: n= 10, edad= 26.6 ± 4.8 años, altura= 175 ± 11.3 cm, peso= 76.9 ± 10.4 kg, y 1RM en sentadilla estimada= 103.4 ± 14.4 kg; mujeres: n= 6, edad= 22.7 ± 1.4 años, altura= 166 ± 6.1 cm, peso= 60.1 ± 12.2 kg, y 1RM sentadilla estimada = 68.3 ± 10.5 kg)
Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue	
ESTUDIO V Fig 8	n=12 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD] edad: 23.6 ± 1.5 años, altura: 178.2 ± 6.6 cm, peso: 76,5kg ± 9.9 kg, carga 1RM en sentadilla: 91.8 ± 16.7 kg; carga 10RM: 69.6 ± 11.9 kg)

6.2. EJERCICIOS

En esta tesis doctoral se ha utilizado el ejercicio de sentadilla completa en todos los estudios y press de banca en el Estudio III. El ejercicio de sentadilla es comúnmente utilizado en la mayoría de las rutinas de entrenamiento de aquellos deportes en los que se requiere la aplicación de altos niveles de fuerza y potencia en miembro inferior como el fútbol, atletismo o halterofilia. Se ha demostrado que fortalece la musculatura de la cadera, muslo y espalda, mejorando el rendimiento deportivo y minimizando el potencial de lesiones (Escamilla, 2001). Este ejercicio consiste en una flexión de cadera y rodillas desde bipedestación, para luego volver a esta postura. Al realizarlo con una barra esta se debe apoyar sobre la musculatura del trapecio junto con retracción escapular para proteger las vertebras. El rango de bajada definirá si la sentadilla es media (muslos paralelos al suelo por encima), o profunda (cadera por debajo de la altura de las rodillas). La sentadilla profunda ha demostrado proporcionar una mayor activación muscular y mejoras en el rendimiento frente a la media sentadilla (Schoenfeld & Williams, 2012). Es por ello por lo que hemos elegido el ejercicio de sentadilla profunda para nuestras investigaciones. Aunque en los Estudios I y III este ejercicio se realizó en una Smith Machine o pórtico guiado mientras que para los Estudios II, IV y V las sentadillas se realizaron en un pórtico de peso libre. El pórtico de peso libre es más común entre los entrenadores, y ha demostrado producir una mayor activación melectromiográfica en la musculatura flexora y extensora de rodilla (Schwanbeck, Chilibeck, & Binsted, 2009), además de permitir un movimiento más real de la barra durante toda la fase de ejecución del ejercicio, haciéndose necesario un mayor control y equilibrio (Cotterman, Darby, & Skelly, 2005). Mientras que el Smith Machine se propone como una alternativa más segura y fácil de usar, ya que requiere menos equilibrio y permite levantar una carga mayor (Cotterman et al., 2005). Además, esta es la opción preferida en la investigación ya que la medición ha demostrado ser más fiable entre sujetos (Pérez Castilla, McMahon, Comfort, & García Ramos, 2020). De la misma monera que la sentadilla representa el ejercicio más global de la musculatura del miembro inferior, el press de banca es considerado para muchos como el ejercicio más característico para evaluar la fuerza y potencia del miembro superior y más usado en los deportes (Pearson, Cronin, Hume, & Slyfield, 2009). Este ejercicio se realiza acostado en un banco, con flexión de hombro y extensión

de codos para sujetar la barra con la manos y se desciende mediante una flexión de codo y extensión de hombro para que una vez llegue la barra al pecho, se vuelva a la posición inicial mediante la flexión de hombro y extensión de codos (Janicijevic, González Hernández, Gu, & Garcia Ramos, 2020).

6.3. VARIABLES DE ESTUDIO

Tabla 3. Nueva de Metodologia

ESTUDIO I	Velocidad de ejecución en sentadillas
	Altura de salto vertical en CMJ
	Acumulación de lactato
	Percepción subjetiva del esfuerzo escala OMNI
ESTUDIO II	Ácido úrico en suero
	Ácido úrico medido en saliva estimulada, utilizando rollitos de algodón (valores corregidos por flujo salival, Proteínas totales salivales y sin corregir)
	Ácido úrico medido en saliva no estimulada obtenida por de flujo pasivo (valores corregidos por flujo salival, Proteínas totales salivales y sin corregir)
ESTUDIO III	Velocidad de ejecución (MV) en sentadilla y press de banca
	Perfil fuerza velocidad (F_{0} , v_{0} , and P_{max}) a través del CMJ y CMJ con carga hasta que pudieran saltar 12 cm y press banca lanzado (PBL) con barra de 20kg y con la carga del 10RM
ESTUDIO IV	CK, AST y LDH en Suero
	CK, AST y LDH en Saliva no estimulada, obtenida por flujo pasivo.

ESTUDIO V	Velocidad de ejecución en sentadilla
	Activación voluntaria (AV)
	Contracción voluntaria máxima (CVM)
	Db 10 Hz
	Db 100Hz
	Twitch
	Ratio Db 10-100 Hz
	CK, AST y LDH en Suero

6.4. TEST Y MATERIALES

6.4.1. Saltos con Contramovimiento CMJ (ESTUDIO I)

El CMJ consiste en una flexo-extensión rápida de cadera y rodillas con una mínima parada entre la fase excéntrica y concéntrica para acabar saltando. Es un indicador de la capacidad reflejo elástica explosiva de las piernas, donde se discrimina la acción de los brazos al realizarse con las manos fijas en la cadera. Se procura que el tronco no se incline hacia adelante permaneciendo recto y las piernas deben estar completamente extendidas durante la fase de vuelo. En el momento de tomar contacto las puntas del pie con el suelo, las rodillas pueden flexionarse para absorber el impacto, pero no antes. Este test ha sido comúnmente elegido para valorar la fatiga, al comparar la pérdida de la altura de salto pre y post series o del entrenamiento de fuerza o sprint (Jimenez Reyes et al., 2016).

La medición para el Estudio I ha sido realizada con una plataforma de contacto (Chronojump, Barcelona, España) con una precisión de 0,1 cm de las mediciones del tiempo de vuelo. Donde a partir del tiempo de vuelo se estima la altura de salto. La plataforma se conecta al ordenador y funciona con el software oficial de Chronojump. En este estudio, la altura de salto en CMJ se midió en siete puntos temporales durante los protocolos TR1, CL1, CL2 y CL3 (se realizaron 3

series); 13 veces en el protocolo TR2 (se realizaron 6 series); y tres veces durante el protocolo CL4 (se realizó 1 serie). Estas mediciones se relacionan con un test antes de empezar cada protocolo, otra justo al acabar la serie y una última 4 min 15 segundos al acabar cada serie. En cada medición, se realizaron tres CMJ máximos separados por 5 segundos, y el intento con la mayor altura de salto se utilizó para el análisis posterior con el fin de cuantificar la fatiga.

6.4.2. Test de detección de la carga del 1RM y 10 RM (ESTUDIOS I-V)

En los Estudios I, II, III y V se realizó el mismo test para determinar la carga del 10RM en sentadillas y en el Estudio III también para press de banca. Diferenciándose del resto, en el ESTUDIO IV, no se perseguía obtener la carga del 10RM, sino estimar aquella que se relacionaba con el 120% del RM en sentadilla. A continuación, se detalla cómo se llevaron a cabo estos protocolos de medición.

Para el ejercicio de Sentadilla el valor del 1RM se estimó con un encoder lineal a través de una prueba de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa hasta alcanzar la carga a la que el sujeto conseguía desplazar a una velocidad de 0,75 m/s (\approx Carga de 10RM (Sánchez Medina & González Badillo, 2011)). Se premisa fue que los sujetos debían realizar la fase concéntrica de todas las repeticiones a la máxima velocidad posible. La carga externa inicial se fijó en 40 kg para todos los sujetos, y se incrementó progresivamente en 20 kg cuando la VMP era superior a 1 m/s, en 10 kg cuando la VMP oscilaba entre 1 m/s y 0,8 m/s, y de 5 a 1 kg cuando la VMP era inferior a 0,8 m/s. Se realizaron cuatro repeticiones cuando la VMP era superior a 1 m/s, dos repeticiones cuando la VMP estaba entre 1 m/s y 0,8 m/s, y sólo una repetición cuando la VMP era inferior a 0,8 m/s. El período de recuperación entre las series fue de tres minutos. Una vez que se obtuvo la carga vinculada a una VMP de 0,75 m/s, los sujetos descansaron durante cinco minutos, y luego se procedió a realizar la segunda parte del test. Los participantes debían realizar todas las repeticiones posibles con esta carga, si conseguían completar las 10 repeticiones, la estimación había sido correcta, si no, era necesario un ligero incremento/disminución en la magnitud de la carga. Se consideró que esta prueba se había realizado correctamente cuando la última repetición se realizaba a una VMP inferior a 0,35 m/s (Sánchez Medina & González Badillo, 2011)

Para el ejercicio de Press de Banca se llevó a cabo un test similar al elegido para la sentadilla, pero con la particularidad de que las velocidades difieren, ya que la relación carga-velocidad no es la misma para los ejercicios de sentadilla y press de banca. La carga del 10RM en press de banca se relaciona con una velocidad de 0,53m/s (González Badillo & Sanchez Medina, 2010). La premisa fue que los sujetos debían realizar la fase concéntrica de todas las repeticiones a la máxima velocidad posible. La carga externa inicial se fijó en 20 kg para todos los sujetos, y se incrementó progresivamente 10kg cuando la VMP era superior a 1m/s hasta llegar a la velocidad de 0,6m/s, donde se producía un incremento entre 5-1 kg para ajustar la carga a la velocidad de 0,53m/s. Se realizaron tres repeticiones cuando la VMP era superior a 1 m/s, dos repeticiones cuando la VMP estaba entre 1 m/s y 0,65 m/s, y sólo una repetición cuando la VMP era inferior a 0,65 m/s. El período de recuperación entre las series fue de tres minutos. Una vez que se obtuvo la carga vinculada a una VMP de 0,53 m/s, los sujetos descansaron durante cinco minutos, y luego se procedió a realizar la segunda parte del test. Los participantes debían realizar todas las repeticiones posibles con esta carga, si conseguían completar las 10 repeticiones, la estimación había sido correcta, si no, era necesario un ligero incremento/disminución en la magnitud de la carga. Se consideró que esta prueba se había realizado correctamente cuando la última repetición se realizaba a una VMP inferior a 0,19m/s (González Badillo & Sanchez Medina, 2010).

Para el Estudio IV, se llevó a cabo otro test con la intención de determinar la carga asociada al 1RM en sentadilla para poder estimar después la carga que representaba el 120%RM. En esta prueba, la carga inicial se fijó en 20 kg para todos los sujetos y se incrementó progresivamente en 10 kg hasta que la VMP de la barra fue inferior a 0,60 m/s ($\approx 80\%1RM$). Se realizaron dos repeticiones con cada carga y se implementaron 3 minutos de descanso pasivo entre series. Se instruyó a los sujetos para que realizaran la fase concéntrica de todas las repeticiones a la máxima velocidad posible. La velocidad registrada en las diferentes cargas se usó para estimar la sentadilla completa 1RM y posteriormente 120%RM a través de un modelo de regresión lineal individual como la carga asociada a una velocidad media de 0,33 m/s (Pérez Castilla, García Ramos, Padial, Morales Artacho, & Feriche, 2017).

Para los Estudios I, II, IV y V, estos test se llevaron a cabo midiendo la velocidad de la barra durante el ejercicio de sentadilla a partir de los datos de tiempo de desplazamiento registrados a 1.000 Hz por un transductor de posición lineal (Chronojump, Barcelona, España). A diferencia del Estudio III, donde para los test de sentadilla y press de banca se usó otro encoder, el T-Force (T-Force System; Ergotech, Murcia, España). Por otro lado, aunque se haya mencionado en apartados anteriores, estos test se llevaron a cabo en el mismo pódico donde se entrenó. En el caso de los Estudios I, II y IV se realizaron en una Smith Machine (Estudio I y IV: Technogym, Cesena, Italia. Estudio III: Multipower FF683; Ffittech, Santo Estevao, Portugal), mientras que para el estudio II y V en un pódico de peso libre (Homcom, Barcelona, España).

6.4.3. Pérdida de Velocidad

Cómo ha sido mencionado en el apartado anterior, la medición de la velocidad a la que se desplazaba la barra durante cada repetición ha sido medida a través de encoders lineales Chronojump (Chronojump, Barcelona, España) para Estudio I, II, IV y V y T-Force (T-Force System; Ergotech, Murcia, España) para Estudio III. La pérdida de velocidad en la serie ha sido determinada al calcular la diferencia entre la primera y la última repetición de cada serie (Estudios I y III) (Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Ambos encoders se vincularon con el software oficial en un ordenador, donde se distinguió automáticamente las fases excéntrica y concéntrica del ejercicio. Posteriormente, el software calculó la VMP como la velocidad media desde la primera velocidad positiva hasta que la velocidad de la barra fue inferior a la de la gravedad (Sanchez Medina et al., 2010). Como novedad, en el Estudio V, se ha propuesto una nueva metodología para cuantificar la fatiga a través de la pérdida de velocidad. Se determinó la pérdida de velocidad entre series, al estudiar la diferencia entre las primeras repeticiones de cada serie. Según nuestro conocimiento, esta estrategia para cuantificar la fatiga no se ha utilizado anteriormente en la literatura científica.

6.4.4. Test Lactato

Fue en el Estudio I donde se empleó la medición de la concentración de

lactato en sangre como medida de fatiga metabólica (Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Estas mediciones se obtuvieron de la yema de los dedos 30 segundos después de la finalización de cada serie. Por lo tanto, se realizaron tres mediciones para los protocolos TR1, CL1, CL2 y CL3 (se realizaron 3 series), seis mediciones para el protocolo TR2 (se realizaron 6 series) y sólo una medición en el protocolo CL4 (se realizó 1 serie). Para las mediciones de lactato se utilizó un analizador de lactato portátil (Lactate Scout, SensLab GmbH, Leipzig, Alemania). El analizador de lactato se calibró antes de cada sesión de ejercicio según las especificaciones del fabricante.

6.4.5. Escala Subjetiva de Percepción del Esfuerzo OMNI

La escala subjetiva de percepción del esfuerzo OMNI (OMNI-RES) se utilizó en el Estudio I como medida de la fatiga perceptiva (Robertson et al., 2003). Los sujetos se habituaron con la escala OMNI-RES durante la sesión de familiarización. Inmediatamente después de terminar cada serie, los sujetos proporcionaron su calificación del esfuerzo percibido utilizando la escala OMNI-RES (0-10) donde 0 es extremadamente fácil y 10 representa extremadamente difícil. Se mostró una imagen de la escala OMNI-RES a los sujetos inmediatamente después de completar cada serie. Por lo tanto, la escala OMNI-RES se utilizó en tres ocasiones durante los protocolos TR1, CL1, CL2 y CL3 (se realizaron 3 series), seis veces en protocolo TR2 (se realizaron 6 series) y sólo una vez en el protocolo CL4 (se realizó 1 serie).

6.4.6. Perfil Fuerza-velocidad

La relación F-v se determinó durante los ejercicios CMJ y PBL a través del método de dos puntos propuesto por García Ramos & Jaric (2018). Se realizaron dos CMJ sin carga (carga ligera) y dos CMJ con la carga externa asociada a una altura de salto de ≈ 12 cm (carga pesada: $51,8 \pm 13,6$ kg) separados por 1 minuto. A continuación, se realizaron dos pruebas del PBL con la barra de máquina Smith descargada (carga ligera: 20 kg para todos los participantes) y dos pruebas con la carga de 10RM (carga pesada: $47,3 \pm 16,5$ kg) separadas por 1 minuto. El intento con la mayor altura de salto (CMJ) y la VMP más rápida (BPT) de cada carga se utilizó para modelar la relación F-v. Cabe señalar que la relación F-v también se determinó

10 minutos después de completar la sesión de RT para evaluar la fatiga residual de las sesiones de RT en F_0 , v_0 y P_{max} .

Los valores propulsivos medios de fuerza y velocidad se utilizaron para determinar la relación F-v durante el ejercicio de la CMJ mediante el método simple propuesto por Samozino y colaboradores (Jiménez Reyes et al., 2017; P. Samozino, Morin, Frédérique, & Alain, 2008). La altura del salto se estimó a partir del tiempo de vuelo utilizando una aplicación móvil validada (MyJump2) que grabó la imagen de vídeo a 240 fotogramas por segundo, a través de un iPhone 8 plus (Balsalobre Fernandez, Glaister, & Lockety, 2015). Los valores medios de propulsión de fuerza y velocidad usados para determinar la relación F-v durante el ejercicio PBL fueron recogidos con un transductor lineal (T-Force System; Ergotech, Murcia, España) (Pérez Castilla et al., 2019). El CMJ con carga y el PBL se realizaron en una máquina Smith (Multipower FF683; Ffittech, Santo Estevao, Portugal). Los valores propulsivos medios de fuerza y velocidad obtenidos en dos condiciones de carga se utilizaron para la evaluación de la relación F-v mediante un modelo lineal: $F(V) = F_0 - aV$, en el que F_0 representa la fuerza de intercepción y a es la pendiente de la relación F-v. También se calcularon la velocidad máxima ($v_0 = F_0/a$) y la potencia máxima ($P_{max} = F_0 \cdot v_0/4$). Una fiabilidad aceptable del método de dos puntos para determinar la relación F-v durante los ejercicios de CMJ y PBL ha sido reportada en otros lugares (García Ramos & Jaric, 2018; Pérez Castilla, Jaric, Feriche, Padial, & García Ramos, 2018).

6.4.7. Evaluación de la Función Neuromuscular

El estudio V destaca en esta tesis por estudiar la fatiga central y periférica tras dos protocolos de entrenamiento de fuerza en sentadilla. Para ello se utilizó la técnica de estimulación superimpuesta/Twitch Interpolation Technique (TIT) para evaluar la activación voluntaria y las propiedades contráctiles de los músculos (Gandevia, 2001), en este caso sobre el cuádriceps. Para ello, los sujetos se sentaban en una silla hecha a mano con las dos rodillas flexionadas a 90° y el torso sujeto con cinturones para evitar cualquier desplazamiento. La pierna derecha se sujetaba a un transductor de fuerza (NL63-200 Kg; Digitimer, Welwyn Garden City, Reino Unido) justo encima de los maléolos. Los estímulos eléctricos musculares

transcutáneos (200 μ s) se suministraron utilizando un estimulador de corriente constante (DS7AH, Digitimer Ltd, Welwyn Garden City, Hertfordshire, Reino Unido). Se colocaron electrodos de superficie autoadhesivos rectangulares (5 \times 9 cm) (Valutrode, Axelgaard Manufacturing Co, Lystrup, Dinamarca) a nivel proximal (sobre el tercio superior del músculo) y distal (justo por encima de la rótula) sobre los extensores de la rodilla. Se administraron estímulos únicos al músculo relajado comenzando en 100 mA y aumentando en 20 mA hasta que se produjo una meseta en la amplitud de las contracciones. La estimulación supramaximal se aseguró aumentando la intensidad final en un 30% (intensidad media de la corriente = 339 ± 36 mA). De esta forma se aseguraba una producción de fuerza máxima que sería medida por la galga de fuerzas.

Las mediciones neuromusculares se realizaron antes del entrenamiento (Pre), 30 segundos después de cada serie, y 1 hora (Post_1h), 24 horas (Post_24h) y 48 horas (Post_48h) después del entrenamiento. Los sujetos realizaron dos contracciones voluntarias máximas (CVM) de 3 segundos durante el ejercicio isométrico de extensión de rodilla separados por 1 minuto de descanso. Sin embargo, después de las series de entrenamiento sólo se realizó un intento. Durante cada CVM, se superpuso un doblete de alta frecuencia (100 Hz) a 1,5 segundos para determinar la fatiga central. Posteriormente, un doblete potenciado de 100 Hz, un doblete de 10 Hz y un solo estímulo se suministraron en reposo 5, 6,5 y 8,5 segundos después del comienzo de la CVM, respectivamente.

La fatiga global se determinó por el valor de la fuerza máxima (F_{max}) alcanzada durante la CVM. Sólo se consideraron para los análisis estadísticos los intentos Pre y el Post con el valor de F_{max} más alto. Los índices de fatiga periférica fueron determinados a partir de las respuestas mecánicas a las estimulaciones simples (contracción máxima, twitch), el doblete potenciado de alta y baja frecuencia (Db100 y Db10, respectivamente), y la relación de fuerzas máximas de estimulación emparejadas a 10 Hz sobre 100 Hz (relación 10:100). La fatiga central se evaluó midiendo la activación voluntaria (AV). De acuerdo con Giandolini y col. (2016), la AV se calculó a partir de la fuerza máxima alcanzada durante la CVM (F_{max}), la fuerza justo antes del doblete superpuesto (F_{antes}), la fuerza máxima que sigue al doblete superpuesto (Db100sup), y Db100 como indicamos en la siguiente ecuación:

$$AV = [1 - [(Db100sup - F \text{ antes}) \times (F \text{ antes} / F_{\text{máx}})] / Db100] \times 100$$

Fórmula 4. Activación Voluntaria

6.4.8. Extracción de Sangre y determinación de los valores de Estrés Metabólico y Daño Muscular

En el Estudio II se determinó la concentración de Ácido úrico en suero como indicador de estrés metabólico. Se realizaron extracciones de sangre de la vena antecubital (5 mL) en un tubo plano para obtener suero (aproximadamente 2 mLs) que se almacenó a -80 °C hasta el análisis. El Ácido úrico se midió utilizando un kit comercial colorimétrico (ácido úrico, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, EE. UU.) siguiendo el método de la Federación Internacional de Química Clínica (IFCC). La primera muestra correspondiente a la línea de base se tomó a las 8:30 AM. Las segundas muestras de suero se recogieron 60 minutos después del entrenamiento. Finalmente, la tercera y cuarta extracción correspondieron a 24 y 48 h post-entrenamiento.

El daño muscular a través de marcadores en suero fue evaluado en los Estudios IV y V. Para el Estudio IV se extrajeron muestras de sangre de la vena antecubital (12 ml) en tubos simples que se utilizaron para medir la CK, AST y LDH (Brancaccio et al., 2010). Las muestras de suero se recogieron al comienzo de la sesión (Pre), 24 horas después del entrenamiento (Post24) y 96 horas después del entrenamiento (Post96). Estas se llevaron a cabo siempre por la mañana (08:00-09:30 horas) en reposo y en ayunas. Los análisis se realizaron por espectrofotometría utilizando kits comerciales (Beckman) en un analizador bioquímico automatizado (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea, USA) (Barranco et al., 2017).

Por el contrario, para el Estudio V, se tuvieron en cuenta los marcadores de daño muscular (CK y AST) en suero medidos antes del entrenamiento (Pre) y 1 hora (Post_1h), 24 horas (Post_24h) y 48 horas (Post_48h) después del entrenamiento. Las extracciones de sangre siempre se recogían por la mañana entre las 8:00-8:30 AM. La única excepción fue el Post_1h que se recogió 1 hora después del entrenamiento. La

sangre se extraía por procedimientos clínicos convencionales de la vena antecubital en tubos simples (5 ml). Los tubos simples se centrifugaron a 2000 g durante 10 minutos para la eliminación cuidadosa del suero y las muestras se congelaron a -80°C hasta que se realizó el análisis.

Los valores de CK y AST en suero se analizaron utilizando los kits disponibles en el mercado (Beckman Coulter, Brea, Estados Unidos de América). El ensayo para las mediciones de CK se basó en la cuantificación de la formación de nicotinamida, adenina y dinucleótido fosfato (NADPH) derivada de la acción de la CK sobre el fosfato de creatina y el adenin difosfato (ADP). El ensayo para las mediciones de AST se basó en la cuantificación del consumo de NADPH derivado de la acción de AST sobre el aspartato y el oxoglutarato. Estos procesos se llevaron a cabo de acuerdo con las recomendaciones de la Federación Internacional de Química Clínica (IFCC). Los calibradores utilizados fueron proporcionados por el fabricante de los equipos comerciales. Los ensayos se realizaron en un analizador automatizado de espectrofotometría bioquímica (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea, EE. UU.).

6.4.9. Extracción de Saliva y determinación de los valores de Estrés Metabólico y Daño Muscular

En el Estudio II, la saliva fue usada para determinar la concentración de Ácido úrico como indicador de estrés metabólico (Deminice et al., 2010). Concretamente, la saliva se recogía aplicando dos procedimientos diferentes: i) flujo pasivo durante 1 min. bajo supervisión, utilizando tubos de poliestireno microcentrifugados estándar de 5 mL con fondos redondos (12 × 75 mm) (Deltalab, 5 mL, Barcelona, España) [15], ii) Salivette con algodón (Sarstedt, Nümbrecht, Alemania). El algodón se masticó durante 1 min y luego se colocó en tubos de centrifugación especiales. Cada muestra se refrigeró o almacenó en hielo hasta su llegada al laboratorio, que no duró más de 45 minutos después de la recogida de la muestra. Todas las muestras se pesaron primero y luego se centrifugaron a 4500× g durante 10 min a 4 °C. El sobrenadante de las muestras de saliva completa obtenida por flujo pasivo y las muestras de saliva obtenidas con algodón se transfirieron a tubos Eppendorf de 1,5 mL y se almacenaron a -80 °C hasta su análisis. En todos los casos el volumen de saliva obtenido fue de 1 mL mínimo. El flujo salival se obtuvo dividiendo el volumen

de saliva por el tiempo del período de muestreo (1 min) (Contreras Aguilar et al., 2017; Rohleder & Nater, 2009). El volumen de saliva se obtuvo restando el peso del tubo vacío del lleno de saliva, y los valores en gramos obtenidos se consideraron equivalentes a mililitros. La cantidad de ácido úrico se multiplicó posteriormente por el caudal (mg/min). La cuantificación de la proteína total de la saliva (Prot.T) expresada en mg/mL se realizó mediante un equipo colorimétrico disponible en el mercado para medir la orina y las proteínas de la región de baja complejidad (LCR) (Proteína en la orina y LCR, Spinreact, España). La primera muestra correspondiente a la línea de base se tomó a las 8:30 AM. Las segundas muestras de suero se recogieron 60 minutos después del entrenamiento. Finalmente, la tercera y cuarta extracción correspondieron a 24 y 48h post-entrenamiento.

Para el Estudio IV se midieron los valores de CK, AST y LDH en saliva como indicadores de daño muscular. Los sujetos realizaron enjuagues bucales antes de recoger cada muestra de saliva. La saliva se recogía con Salivettes de flujo pasivo. Estos consistían en un tubo con pajita (flujo pasivo) y los sujetos salivaban durante 1 minuto. Estas extracciones se llevaron a cabo siempre por la mañana (08:00-09:30 horas) en reposo y en ayunas. Los Salivettes se almacenaban en hielo hasta que se terminaban todas las mediciones. Estos se centrifugaban a 3.500 rpm durante 7 minutos, y el sobrenadante se extraía del tubo y se almacenaba a -80 °C hasta que se analizaba. La CK, AST y LDH se midieron con kits comercial (Barranco et al., 2017). Todos los ensayos se adaptaron para su uso en muestras de saliva y se realizaron en un analizador bioquímico automatizado (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea, EE.UU.) a 37 °C (Barranco et al., 2017). El análisis de saliva se realizó utilizando valores absolutos y siguiendo el proceso de validación según Barranco et al. (Barranco et al., 2017).

6.5. PROCEDIMIENTOS

6.5.1. ESTUDIO I

El diseño del Estudio I se organizó en siete sesiones: los sujetos vinieron al laboratorio en siete ocasiones distintas durante cuatro semanas consecutivas. La

primera sesión de pruebas se utilizó para asegurar que todos los sujetos incluidos en el experimento fueran capaces de realizar el sentadillas y saltos de forma correcta y para identificar su carga de 10RM. Durante las siguientes tres semanas, los sujetos realizaron dos sesiones por semana, separadas por 48-72 horas. Estas sesiones fueron dedicadas a realizar los protocolos de entrenamiento en orden aleatorio. Concretamente, dos protocolos de configuraciones de la serie tradicionales (TR) (es decir, sin descanso entre las repeticiones) que difirieron en el nivel de esfuerzo (series \times repeticiones: TR1: 3×10 ; TR2: 6×5) y cuatro configuraciones de la serie Cluster diferentes (CL) que difieren en la duración del período de descanso entre las repeticiones (series \times repeticiones [descanso entre las repeticiones]: CL1: 3×10 [10 s]; CL2: 3×10 [15 s]; CL3: 3×10 [30 s]) o en el número de series (series \times repeticiones [TIR]: CL4: 1×30 [15 s]). El número de repeticiones (30), el descanso entre sets (5 min) y la carga utilizada (10RM) fueron los mismos para todas las configuraciones de sets. Cada día los sujetos realizaron una activación estandarizada de 10 minutos que incluyó trote, ejercicios de movilidad. Las sesiones se realizaron por las tardes, a la misma hora del día para cada sujeto (± 1 h), y bajo condiciones ambientales constantes (~ 20 °C y $\sim 60\%$ de humedad).

La velocidad de ejecución fue registrada durante todas las repeticiones de cada entrenamiento para poder cuantificar la fatiga mecánica producida a través de la pérdida de velocidad en las series. Además, con el fin de completar esta visión de fatiga mecánica, se evaluó la pérdida de altura de salto CMJ, comparando los saltos realizados pre y justo al acabar cada serie. Al igual que la percepción subjetiva del esfuerzo, ya que los sujetos tenían que indicar el nivel de esfuerzo percibido en la escala OMNI justo al acabar cada serie. Tras 30 segundos de completar cada serie y haber aportado el valor de OMNI y realizar el salto CMJ, los sujetos se sometían a la prueba de lactato. De esta forma se completaba el estudio de la fatiga desde un punto de vista metabólico.

6.5.2. ESTUDIO II

El esquema del Estudio II se inició con dos sesiones previas de familiarización donde nos asegurábamos de que los sujetos realizaban de forma correcta la sentadilla en peso libre y los instruíamos en la técnica de salivación de flujo pasivo

y salivette de algodón. En la segunda de estas sesiones se llevó a cabo el test para de terminar la carga del 10RM (descrito en el apartado de test). Posteriormente se llevó a a cabo dos sesiones de entrenamiento de fuerza en orden aleatorio. Estas dos sesiones consistieron en un protocolo de fuerza hasta el fallo (6 series de 10 repeticiones) y el otro hasta el no fallo (6 series de 5 repeticiones), ambos con la carga del 10RM y respetando 5 minutos de recuperación entre series. Antes de cada entrenamiento se determinó la línea base de mediante la extracción de saliva y suero en condiciones de ayuno. Después, los sujetos tomaron un desayuno (jugo y una tostada con tomate y aceite de oliva). Una hora más tarde, hicieron un protocolo de calentamiento estandarizado (5 minutos de trote, movilidad articular, 2 esprints de 20 m y 2 series de 4 sentadillas con el 40 y el 60% del peso corporal), seguido de la sesión de entrenamiento del protocolo que le correspondía. Las mediciones propias a los tiempos Post entrenamiento se realizaron a los 60 minutos, 24 y 48h, donde se repitieron las extracciones de saliva y suero, con la intención de comprobar la respuesta tardía del ácido úrico tras estos dos protocolos de entrenamiento de fuerza. Cada sesión se realizó por la mañana en el mismo horario para cada individuo (± 1 h), bajo condiciones ambientales constantes (20 °C y 60% de humedad).

Se tomaron muestras de saliva y sangre en cuatro momentos diferentes. La primera muestra, correspondiente a la línea de base, se tomó a las 8:30 AM. La segunda muestra de saliva y suero se recogió 60 minutos después del entrenamiento. Finalmente, la tercera y cuarta extracción correspondieron a 24 y 48h post-entrenamiento. El orden de extracción fue primero saliva por flujo pasivo, seguido de la extracción de saliva con salivette de algodón y finalmente se realizaba la extracción de la muestra de suero. A los participantes no se les permitía comer, beber café o refrescos con cafeína y consumir productos lácteos una hora antes de la recogida de muestras de saliva. Además, cinco minutos antes de la recogida de saliva se pidió a los participantes que se enjuagaran la boca con agua para evitar contaminaciones.

6.5.3. ESTUDIO III

El diseño de este estudio se organizó en seis sesiones, dos veces por semana, separadas por al menos 48 horas, durante tres semanas consecutivas. Las sesiones

1-2 se utilizaron para asegurar que todos los participantes pudieran realizar los ejercicios de SQ, salto CMJ, PB y PBL con la técnica adecuada con una variedad de cargas externas. La sesión 3 se utilizó para determinar la carga de 10RM durante los ejercicios de SQ y PB, así como la carga externa asociada con una altura de salto de 12 cm durante el ejercicio de CMJ. La carga de 10RM determinada en la sesión 3 se aplicó durante las sesiones experimentales restantes. Tras los estudios previos, la carga externa asociada a una altura de salto de 12 cm se utilizó para determinar la relación F-v durante el ejercicio de CMJ en las tres sesiones experimentales principales.

Las tres sesiones experimentales principales (sesiones 4-6) consistieron en tres series de cinco repeticiones contra la carga de 10RM durante los ejercicios de SQ y PB. La única diferencia entre las tres sesiones experimentales fue la duración del descanso entre series (1 minuto [Rec 1'], 3 minutos [Rec 3'] y 5 minutos [Rec 5']). El orden de los ejercicios de SQ y PB fue contrarrestado entre los participantes, pero se siguió el mismo orden para los participantes individuales en las tres sesiones experimentales. El orden de los protocolos de descanso entre serie fue aleatorio. La relación F-v durante los ejercicios de CMJ y PBL se determinó en dos ocasiones durante cada sesión: 5 min. después del calentamiento (Pre) y 10 min. después de la última sesión de entrenamiento (Post). Todas las sesiones se realizaron a la misma hora del día para cada participante.

6.5.4. ESTUDIO IV

En el Estudio IV se utilizó un diseño de medidas repetidas para investigar la respuesta de daño muscular a un protocolo de entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado realizado con el ejercicio completo de sentadilla. El protocolo de entrenamiento consistió en 8 series de 10 repeticiones con el 120% de carga estimada del 1RM. La duración de la fase excéntrica se fijó en 3 segundos y se implementaron 5 minutos de descanso entre series. Los sujetos acudieron al laboratorio en cuatro ocasiones. La primera sesión se utilizó para familiarizar a los sujetos con el proceso de extracción de saliva, determinar la carga estimada de 1RM durante el ejercicio de sentadilla completa, y certificar que todos los sujetos eran capaces de realizar el protocolo de sentadilla completa excéntrica con una técnica adecuada. La segunda

sesión tuvo lugar después de 72 horas de descanso para realizar el protocolo de entrenamiento de fuerza excéntrica. Las muestras de suero y saliva se recogieron al comienzo de la sesión 2 (Pre), 24 horas después del entrenamiento (sesión 3; Post24) y 96 horas después del entrenamiento (sesión 4; Post96). Las extracciones de suero y saliva se realizaron siempre por la mañana (08:00-09:30 horas) en reposo y en ayunas.

6.5.5. ESTUDIO V

El diseño del Estudio I consistió en una propuesta de medidas repetidas para comparar los marcadores agudos y retardados de fatiga mecánica, neuromuscular y bioquímica entre las sesiones de fuerza que conducen o no al fallo. Cada sujeto participó en cuatro sesiones (dos de familiarización y dos experimentales). Todas las sesiones estuvieron separadas por una semana y se realizaron a la misma hora del día para cada sujeto y en condiciones ambientales constantes (20-22°C y 55-60% de humedad relativa). Los sujetos demostraron una técnica adecuada durante el ejercicio de SQ y la carga máxima de 10RM se determinó en la segunda sesión de familiarización. Durante las sesiones de familiarización, también se pidió a los sujetos que realizaran dos CVM con y sin estimulación eléctrica TIT, con la intención de familiarizarlos con la prueba de función neuromuscular.

Las dos sesiones experimentales (protocolos de fallo y no fallo) se realizaron en un orden compensado. Cada sesión consistió en 6 series de ejercicios de SQ realizados en un pórtico de peso libre (Homcom, Barcelona, España) contra una carga de 10RM (75% de 1RM) con 5 minutos de descanso entre series. Los protocolos de fuerza sólo se diferenciaban en el número de repeticiones realizadas por serie. En el protocolo al fallo las series se realizaron hasta el fallo, mientras que en el protocolo de no fallo se realizó la mitad del de las repeticiones posibles (es decir, 5 repeticiones). Se instruyó a los sujetos para que realizaran la fase concéntrica de todas las repeticiones lo más rápido posible, y la fase excéntrica a una velocidad controlada y autoseleccionada. Antes de las sesiones de fuerza, se realizó una activación estandarizada, que incluía 5 minutos de trote, ejercicios de movilidad articular, dos series de ocho repeticiones en el ejercicio SQ sin carga, cinco saltos progresivos CMJ, dos repeticiones SQ con la carga de 10RM, y tres CVM.

Se establecieron los valores basales (pre) de suero y la evaluación de la función neuromuscular antes del entrenamiento. La velocidad de ejecución fue medida durante todas las repeticiones para ambos protocolos y la función neuromuscular se llevó a cabo a los 30 s post cada serie. Por último, se realizaron extracciones de suero y la evaluación de la función neuromuscular se repitieron 1, 24 y 28 horas Post entrenamiento.

Con la intención de resumir la metodología de cada estudio, a continuación, se exponen las siguientes figuras:

Figura 4: Metodología Estudio 1

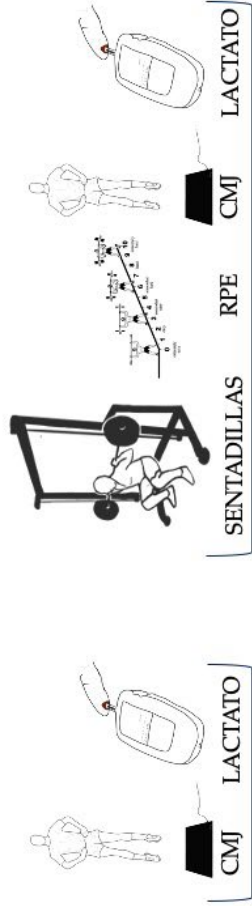
Estudio 1: Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat

PARTICIPANTES n=11 estudiantes de Ciencias del Deporte (media \pm desviación Standard [SD]; edad 23.3 ± 2.0 años; peso 79.3 ± 5.5 kg y altura 178.8 ± 4.7 cm)

PROCEDIMIENTO

Protocolos	Series	Repeticiones	IRR
TR1	3	10	-
TR2	6	5	-
CL1	3	10	10
CL2	3	10	15
CL3	3	10	30
CL4	1	30	15

* Todos los protocolos con la carga del 75% RM y recuperación de 5 min entre series.



*Esta secuencia se repitia en cada serie

MATERIALES



Sentadillas realizadas en una Smith Machine (Technogym, Cesena, Italia)



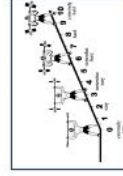
Medición de la velocidad de ejecución durante las sentadillas a través de un encoder lineal (Chronojump, Barcelona, España)



Medición de altura de salto de CMJ mediante plataforma de contacto (Chronojump, Barcelona, España)



Medición de lactato usando un analizador de Lactato portátil (Lactate Scout, SensLab GmbH, Leipzig, Alemania)



Escala subjetiva de percepción del esfuerzo OMNI (0-10)

Figura 5: Metodología Estudio 2

Estudio 2: Influence of sampling conditions, salivary flow and total protein content in uric acid measurements in saliva

PARTICIPANTES n= 12 estudiantes de Ciencias del Deporte de Ciencias del Deporte (media \pm desviación Standard [SD]; edad 23.5 ± 3.5 años, peso 73 ± 7.2 kg y altura 177 ± 10.1 cm)

PROCEDIMIENTO

Protocolos	Serías	Repeticiones
Fallo	6	10
No Fallo	6	5

* Todos los protocolos con la carga del 75%RM y recuperación de 5 min entre series.



MATERIALES

<p>Las sentadillas fueron realizadas en un pórtico de peso libre Homcom (Barcelona, España)</p>	<p>Las recolecciones de suero se realizaron con Vacutainer mientras que la saliva fue extraída por dos métodos diferentes, Salivette con algodón y Flujo Pasivo durante 1 min de salivación. (Sarstedt, Nümbrecht, Alemania).</p>			<p>El ácido úrico fue determinado a través de un kit comercial de colorimetría Olympus A400, (Uric acid, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA)</p>

Figura 6: Metodología Estudio 3

Estudio 3: Effect of different interset rest intervals on mean velocity during the squat and bench press exercises

PARTICIPANTES n= 15 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD]; edad= 20.3 ± 3.3 años, peso = 72.1 ± 8.3 kg, altura= 173 ± 4.2 cm, SQ 10RM = 63.2 ± 11.7 kg, y BP 10RM = 47.3 ± 16.5 kg)

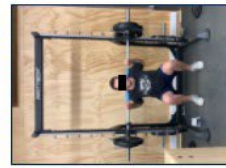


PROCEDIMIENTO

Protocolos
Rec 1 min
Rec 3 min
Rec 5 min

* Todos los protocolos con la carga del 75%RM, realizando 3 series de 5 repeticiones

MATERIALES



Ejercicios de sentadilla, press de banca, CMJ con carga y press de banca lanzados realizados en una Smith machine (Multipower FF683; Ffitech, Santo Estevao, Portugal).



Medición de la relación fuerza velocidad durante los saltos CMJ usando la app móvil MyJump 2 en iPhone 8 plus (Balsalobre-Fernandez, Glaister, & Lockey, 2015).



Medición de la relación fuerza velocidad durante los press de banca lanzado usando un Encoder Lineal (T-Force System; Ergotech, Murcia, España)

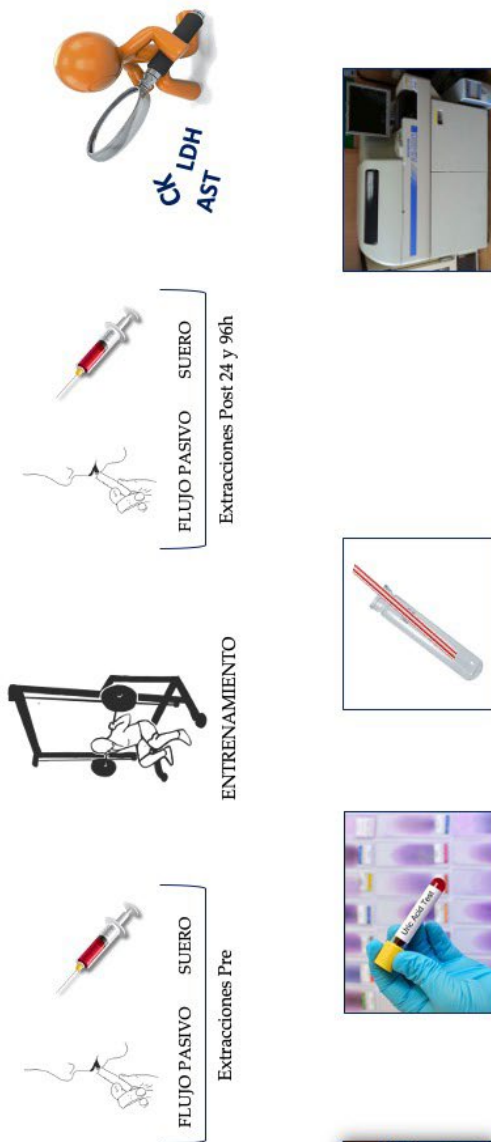
Figura 7: Metodología Estudio 4

Estudio 4: Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol

PARTICIPANTES n=16 estudiantes de Ciencias del Deporte (media \pm desviación Standard [SD]); hombres: n= 10, edad= 26.6 \pm 4.8 años, altura= 175 \pm 11.3 cm, peso= 76.9 \pm 10.4 kg, y IRM en sentadilla estimada= 103.4 \pm 14.4 kg; mujeres: n= 6, edad= 22.7 \pm 1.4 años, altura= 166 \pm 6.1 cm, peso= 60.1 \pm 12.2 kg, y IRM sentadilla estimada = 68.3 \pm 10.5 kg)

PROCEDIMIENTO

Protocolo
8x 10 Sentadillas con
3'' fase ECC rec 5min
Carga 120%RM



MATERIALES



Sentadillas realizadas en una Smith Machine (Technogym, Cesena, Italia)



Las recolecciones de suero se realizaron con Vacutainer mientras que la saliva fue extraída por dos métodos diferentes, Salivette con algodón y Flujo Pasivo durante 1 min de salivación. (Sarstedt, Nümbrecht, Alemania).



CK, AST y LDH en sangre y saliva fueron determinado a través de un kit comercial de colorimetría Olympus A400, (Uric acid, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA)

Figura 8: Metodología Estudio 5

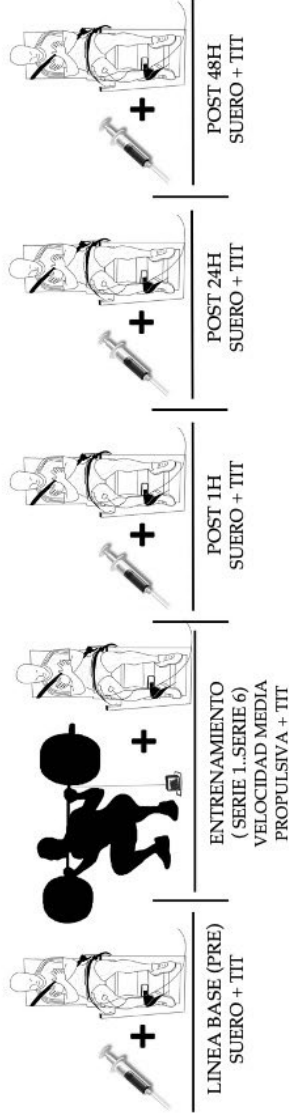
Estudio 5: Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue

PARTICIPANTES n=12 estudiantes de Ciencias del Deporte (media ± desviación Standard [SD edad: 23.6 ± 1.5 años, altura: 178.2 ± 6.6 cm, peso: 76,5kg ± 9.9 kg, carga 1RM en sentadilla: 91.8 ± 16.7 kg; carga 10RM: 69.6 ± 11.9 kg)

PROCEDIMIENTO

Protocolos	Series	Repeticiones
Fallo	6	10
No Fallo	6	5

* Todos los protocolos con la carga del 75%RM y recuperación de 5 min entre series.



MATERIALES



Las sentadillas fueron realizadas en un pórtico de peso libre midiendo la velocidad de ejecución con un encoder lineal (Chronojump, Barcelona, España)



Para la medición de la fatiga central y periférica se usó una silla, hecha a mano para la realización de contracciones isométricas máxima de los extensores de rodilla usando una galga de fuerzas (NL63-200 Kg; Digitimer, Welwyn Garden City, Reino Unido).



La estimulación fue realizada mediante un estimulador eléctrico (DS7AH, Digitimer Ltd, Welwyn Garden City, Hertfordshire, Reino Unido) sobre el cuádriceps a través de unos electrodos adhesivos (Valutrode®, Axelgaard Manufacturing Co, Lystrup, Dinamarca)



Determinación de la CK, AST y LDH en sangre a través de espectrofotometría usando kit comercial (Beckman) en un analizador bioquímico automatizado (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea USA)



VII

Estudio I

VII/ ESTUDIO I

MECHANICAL, METABOLIC, AND PERCEPTUAL ACUTE RESPONSES TO DIFFERENT SET CONFIGURATIONS IN FULL SQUAT

JORGE M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ,¹ AMADOR GARCÍA-RAMOS,^{2,3} ADRIÁN CASTAÑO-ZAMBUDIO,¹ FERNANDO CAPELO-RAMÍREZ,¹ GONZALO MARQUEZ,¹ DANIEL BOULLOSA,^{4,5} AND PEDRO JIMÉNEZ-REYES¹

¹Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio, Murcia, Spain; ²Department of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Granada, Granada, Spain; ³Faculty of Education, Catholic University of the Holy Conception, Concepción, Chile; ⁴Post-Graduate Program in Physical Education, Catholic University of Brasília, Brasília, Brazil and ⁵Sport and Exercise Science, College of Healthcare Sciences, James Cook University, Townsville, QLD, Australia

ABSTRACT

González-Hernández, JM, García-Ramos, A, Castaño-Zambudio, A, Capelo-Ramírez, F, Marquez, G, Boullosa, D, and Jiménez-Reyes, P. Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat. *J Strength Cond Res* 34(6): 1581–1590, 2020—This study aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between 2 traditional (TR) and 4 cluster (CL) set configurations. In a counterbalanced randomized order, 11 men were tested with the following protocols in separate sessions (sets × repetitions [interrepetition rest]): TR1: 3 × 10 [0 seconds]; TR2: 6 × 5 [0 seconds]; CL1: 3 × 10 [10 seconds]; CL2: 3 × 10 [15 seconds]; CL3: 3 × 10 [30 seconds]; CL4: 1 × 30 [15 seconds]. The exercise (full squat), number of repetitions (30), interset rest (5 minutes), and resistance applied (10 repetition maximum) was the same for all set configurations. Mechanical fatigue was quantified by measuring the mean propulsive velocity during each repetition and the change in countermovement jump height observed after each set and after the whole training session. Metabolic and perceptual fatigue were assessed via the blood lactate concentration and the OMNI perceived exertion scale measured after each training set, respectively. The mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue were always significantly higher for the TR1 set configuration. The 2 set configurations that most minimized the mechanical measures of fatigue were CL2 and CL3. Perceived fatigue did not differ between the TR2, CL1, CL2, and CL3 set configurations. The lowest lactate concentration was observed in the CL3 set configuration. Therefore, both the CL2 and CL3 set configurations can be recommended because they maximize

mechanical performance. However, the CL2 set configuration presents 2 main advantages with respect to CL3 (a): it reduces training session duration, and (b) it promotes higher metabolic stress, which, to some extent, may be beneficial for inducing muscle strength and hypertrophy gains.

KEY WORDS lower-body strength, resistance training, interrepetition rest, neuromuscular fatigue

INTRODUCTION

Muscular strength, one of the components of physical fitness, is very important for enhancing both health status (30) and athletic performance (38). Resistance training is undeniably the most effective method to improve muscular strength (28). Previous research has focused on identifying the optimal manipulation of acute variables of resistance training (e.g., exercise type and order, number of sets and repetitions, loading magnitude, rest between sets, and movement velocity) for maximizing muscular strength gains in different populations (21,37). One acute variable of resistance training that has gone almost unnoticed is the possibility of implementing brief rest periods between the individual repetitions (interrepetition rest) or groups of repetitions (intra-set rest) performed within a training set (39). The training method that includes intermittent rest within a set is known as cluster training (11,12).

The primary effect of cluster set configurations is the reduction of fatigue when compared with traditional set configurations based on continuous repetitions (11). Previous studies have shown that cluster set configurations may increase both the quality (i.e., higher velocity and hence more power) and the volume (i.e., more repetitions per set) of resistance training sessions, while reducing perceived exertion (3–5,12,13,15–18,22,23,40). Thus, cluster training may be beneficial not only for athletes (14) but also for the general population because the same amount of work can be

Address correspondence to Jorge M. González-Hernández, jormigohe91@gmail.com.

34(6)/1581–1590

Journal of Strength and Conditioning Research
© 2017 National Strength and Conditioning Association

7.1. INTRODUCTION

Muscular strength, one of the components of physical fitness, is very important for enhancing both health status (Ruiz et al., 2008) and athletic performance (Suchomel, Nimphius, & Stone, 2016). Resistance training is undeniably the most effective method to improve muscular strength (Rhea et al., 2003). Previous research has focused on identifying the optimal manipulation of acute resistance-training variables (e.g., exercise type and order, number of sets and repetitions, loading magnitude, rest between sets, and movement velocity) for maximizing muscular strength gains in different populations (Latham, Bennett, Stretton, & Anderson, 2004; Spiering et al., 2008). One acute resistance-training variable that has gone almost unnoticed is the possibility of implementing brief rest periods between the individual repetitions (inter-repetition rest) or groups of repetitions (intra-set rest) performed within a training set (Tufano, Brown, et al., 2016). The training method that includes intermittent rest within a set is known as cluster training (Haff & Stone, 2003; Haff et al., 2008).

The primary effect of cluster set configurations is the reduction of fatigue when compared to traditional set configurations based on continuous repetitions (Haff et al., 2008). Previous studies have shown that cluster set configurations may increase both the quality (i.e., higher velocity and hence more power) and the volume (i.e., more repetitions per set) of resistance training sessions, while reducing perceived exertion (García Ramos et al., 2016, 2015; Girman et al., 2014; Haff & Stone, 2003; Hansen, Cronin, & Newton, 2011; Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012; Hardee, Triplett, et al., 2012; Iglesias Soler et al., 2014, 2012; Lawton et al., 2006; Mayo et al., 2014; Tufano, Conlon, Nimphius, Brown, Seitz, Williamson, & Haff, 2016). Thus, cluster training may be beneficial not only for athletes (Hansen, Cronin, Pickering, et al., 2011), but also for the general population since the same amount of work can be done with less perception of effort (Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012). Because the most striking effect of cluster set configurations is the maintenance of velocity over a larger number of repetitions, previous literature has mainly focused on the effects of cluster sets on power adaptations, while the effects of cluster sets on maximum strength and hypertrophy adaptations have been less studied (Tufano, Brown, et al., 2016).

It has been argued that the lower metabolic stress induced by cluster set configurations may be detrimental to the induction of hypertrophic adaptations (Girman et al., 2014; Oliver et al., 2015b). In contrast, recent studies have suggested that training to failure (i.e., maximizing metabolic stress) may not be needed to maximize hypertrophic adaptations (Sampson & Groeller, 2016). In fact, performing only half the maximum possible number of repetitions per set (i.e., level of effort reduced by a 50%) could be enough when the total volume (i.e., the number of repetitions) is controlled between groups (Izquierdo, Ibañez, González Badillo, et al. 2006). In this regard, velocity loss has been proposed as a practical and valid criterion to decide when a training set should be stopped to maximize training adaptations (González Badillo, Yañez García, Mora Custodio, & Rodríguez Rosell, 2017; González Badillo et al., 2011; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Therefore, cluster set configurations may be useful to increase the number of repetitions per set that can be performed before the critical fatigue threshold (assessed as velocity or power output losses) is reached (García Ramos et al., 2016). Greater training volumes are associated with greater hypertrophic adaptation (Schoenfeld, Ogborn, & Krieger, 2017). Thus, it would seem of interest to evaluate mechanical, metabolic, and perceptual responses to different cluster set configurations performed with the loads commonly applied during hypertrophy-oriented resistance training sessions.

Blood lactate is one of the most common markers of metabolic stress in resistance training research (Gorostiaga et al., 2014). Recent studies have revealed a good association between several markers of mechanical fatigue, such as velocity loss during a training set and countermovement jump [CMJ] height loss, and metabolic markers of fatigue such as lactate and ammonia concentrations (Jimenez Reyes et al., 2016; Morcillo et al., 2015; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Additionally, perceived exertion scales are becoming increasingly popular for monitoring resistance training fatigue (F Naclerio & Larumbe Zabala, 2016; Zourdos et al., 2016). Although some of these markers of fatigue have been previously used to compare traditional and cluster set configurations, to the best of our knowledge, no study has used these four markers of fatigue (i.e., blood lactate concentration, velocity loss within a set, CMJ height loss, and perceived exertion) to compare the acute responses between traditional and cluster training.

Therefore, the objective of the current study was to assess the acute fatigue induced by two traditional training protocols differing in the level of effort (repetitions to failure vs. half the maximum number of repetitions), and four cluster training protocols differing in either the duration of the inter-repetition rest period (10 s vs. 15 s vs. 30 s) or the number of sets performed (1 vs. 3). Specifically, we aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between different traditional and cluster set configurations in the full-squat exercise performed with 10RM load (i.e., the load with which subjects can perform a maximum of 10 continuous repetitions). It was hypothesized that all cluster set configurations would elicit lower mechanical, metabolic, and perceptual fatigue than both traditional set configurations.

7.2. METHODS

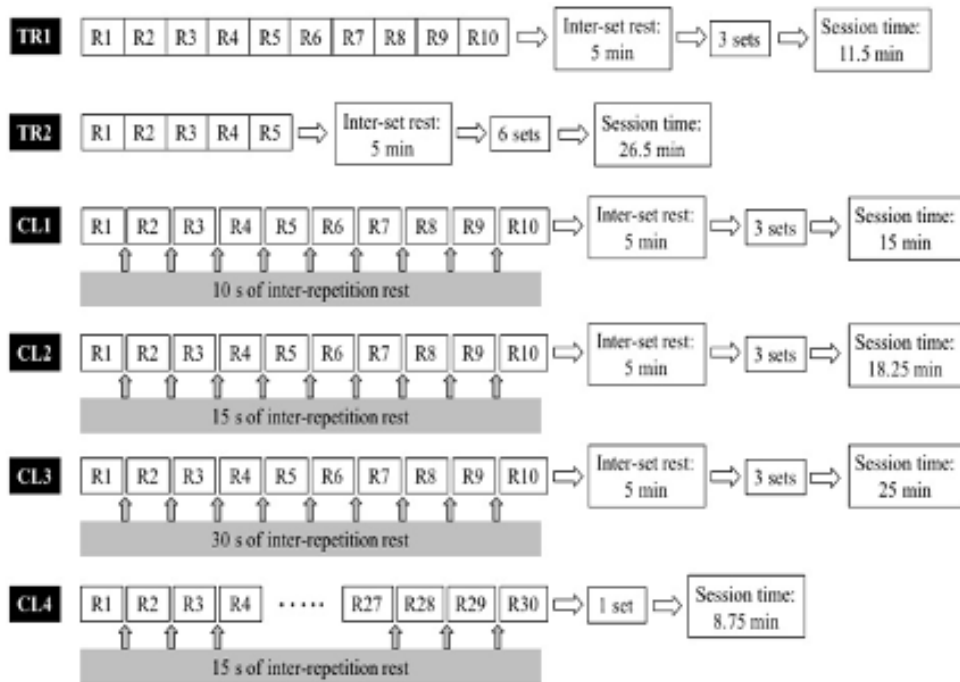
7.2.1. Experimental approach to the problem

A repeated-measures design was used to investigate the effect of different set configurations on mechanical, metabolic and perceptual measures of fatigue during multiple sets in the full-squat exercise. Subjects came to the laboratory on seven separate occasions over four consecutive weeks. The first testing session was used to ensure that all subjects included in the experiment were able to perform the full-squat exercise using the proper technique, and to identify their 10RM load. During the next three weeks, the subjects performed two sessions per week, separated by 48-72 hours. In each testing session the subjects performed one of the six different set configurations in a counterbalanced randomized order. Specifically, two traditional (TR) set configurations (i.e., no rest between repetitions) differing in the level of effort (sets \times repetitions: TR1: 3 \times 10; TR2: 6 \times 5) and four different cluster (CL) set configurations differing in either the duration of the inter-repetition rest period (sets \times repetitions [inter-repetition rest]: CL1: 3 \times 10 [10 s]; CL2: 3 \times 10 [15 s]; CL3: 3 \times 10 [30 s]) or the number of sets (sets \times repetitions [IRR]: CL4: 1 \times 30 [15 s]) were assessed (see Figure 9). The number of repetitions (30), the inter-set rest (5 min), and the load used (10RM) were the same for all set configurations. Sessions were performed in the afternoons, at the same time of day for each subject (\pm 1 h), and under constant environmental conditions (\sim 20 °C and \sim 60%

humidity) of mechanical fatigue, such as velocity loss during a training set and countermovement jump [CMJ] height loss, and metabolic markers of fatigue such as lactate and ammonia concentrations (Jimenez Reyes et al., 2016; Morcillo et al., 2015; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Additionally, perceived exertion scales are becoming increasingly popular for monitoring resistance training fatigue (Naclerio & Larumbe Zabala, 2016; Zourdos et al., 2016). Although some of these markers of fatigue have been previously used to compare traditional and cluster set configurations, to the best of our knowledge, no study has used these four markers of fatigue (i.e., blood lactate concentration, velocity loss within a set, CMJ height loss, and perceived exertion) to compare the acute responses between traditional and cluster training.

Therefore, the objective of the current study was to assess the acute fatigue induced by two traditional training protocols differing in the level of effort (repetitions to failure vs. half the maximum number of repetitions), and four cluster training protocols differing in either the duration of the inter-repetition rest period (10 s vs. 15 s vs. 30 s) or the number of sets performed (1 vs. 3). Specifically, we aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between different traditional and cluster set configurations in the full-squat exercise performed with 10RM load (i.e., the load with which subjects can perform a maximum of 10 continuous repetitions). It was hypothesized that all cluster set configurations would elicit lower mechanical, metabolic, and perceptual fatigue than both traditional set configurations.

Figure 9. Traditional (TR; no rest between repetitions) and cluster set configurations (CL; a rest period was introduced between individual repetitions) analyzed in the present study. R: repetition.



Mechanical fatigue was quantified by measuring the mean propulsive velocity (MPV) during each repetition, and the change in CMJ height observed after each set and after the whole training session. Metabolic fatigue was assessed via the blood lactate concentration measured after each training set. Finally, perceptual fatigue was assessed with the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise (Robertson et al., 2003) at the end of each set.

7.2.2. Subjects

Eleven strength-trained male sport science students (mean \pm SD: age 23.3 ± 2.0 years, body mass 79.3 ± 5.5 kg, height 178.8 ± 4.7 cm) volunteered to participate

in this study. No physical limitations, health problems or musculoskeletal injuries that could affect testing or training were found after a medical examination. None of them declared the use of drugs, medications or dietary supplements known to influence physical performance. All subjects were informed of the benefits and risks of the investigation prior to signing an institutionally approved informed consent document to participate in the study. The study protocol adhered to the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki) and was approved by the Institutional Review Board.

7.2.3. Procedures

The full study protocol was composed of seven sessions: one initial test session and six different protocol sessions. The warm-up and the procedure used to determine the 10RM load was identical for all subjects in all sessions. Subjects performed a 10-min standardized warm-up that included jogging, joint mobility exercises, two sets of eight repetitions in the unloaded squat, five progressive CMJs, and two sprints of 20 meters. Once the warm-up was completed, a progressive loading test in the full-squat exercise was performed until the load produced an MPV of $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (\approx 10RM load according to Sánchez Medina and González Badillo (2011)). The initial external load was set at 40 kg for all subjects, and was progressively increased by 20 kg when the MPV was higher than $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 10 kg when the MPV was between $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and from 5 to 1 kg when the MPV was below $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Four repetitions were performed when the MPV was above $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, two repetitions when the MPV was between $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and only one repetition when the MPV was below $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The recovery period between sets was three minutes. A linear encoder (Chronojump, Barcelona, Spain) was used to measure the velocity of the bar. Once the load linked to an MPV of $0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ was obtained, the subjects rested for five minutes, and then this load was lifted as many times as possible to determine whether this load was close to the 10RM or if a slight increment/decrement in the magnitude of the load was needed. This test was considered to be properly performed when the last repetition was lifted at an MPV lower than $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Sánchez Medina & González Badillo, 2011).

7.2.4. Set configurations

Subjects performed the six different set configurations in a counterbalanced randomized order over three consecutive weeks (two sessions per week separated by 48-72 hours). Two traditional set configurations (TR; no rest between repetitions) and four cluster set configurations (CL; a rest period was introduced between successive repetitions) were analyzed in the present study:

- TR1: 3 sets of repetitions to muscle failure with the 10RM load with no rest between repetitions.
- TR2: 6 sets of 5 repetitions with no rest between repetitions.
- CL1: 3 sets of 10 repetitions with 10 seconds of rest between each repetition.
- CL2: 3 sets of 10 repetitions with 15 seconds of rest between each repetition.
- CL3: 3 sets of 10 repetitions with 30 seconds of rest between each repetition.
- CL4: 1 set of 30 repetitions with 15 seconds of rest between each repetition.

The two traditional set configurations differed in the level of effort (TR1: repetitions to muscle failure; TR2: half the maximum possible number of repetitions per set). The only difference between CL1, CL2 and CL3 was the duration of the rest period between repetitions. Finally, CL4 used the same inter-repetition rest period as CL2 (15 seconds), but all the volume (i.e., 30 repetitions) was performed in only one set, thus reducing the session duration. The inter-set rest (5 min) and the resistance applied (10RM) was the same for the six set configurations. The 10RM load was adjusted in each testing session to account for possible training effects (Sánchez Medina & González Badillo, 2011).

The full-squat exercise was chosen because it is one of the most effective exercises that can be used to enhance lower-body muscular strength (Schoenfeld, 2010a). The depth of the squat was performed until the crease of the hip descended below the knees. An elastic cord was used to ensure the correct depth in each repetition and monitored through the linear encoder. All testing sessions were conducted using a Smith machine (Technogym, Cesena, Italy) to ensure a vertical displacement of the bar. All sessions were carried out under the direct supervision of the primary author of this study, who verbally encouraged the subjects to

perform all repetitions at the maximum possible velocity. Note that training at the maximum intended velocity induces greater training adaptations than deliberately slower velocity training (González Badillo et al., 2014). A timer was used to monitor the duration of the rest periods in the four CL protocols. Subjects were instructed to keep their feet on the floor during the inter-repetition rest periods to avoid differences in execution technique between repetitions.

7.2.5. Measures of fatigue

Movement velocity. The reduction in the velocity of the bar was used as a measure of mechanical fatigue (Sánchez Medina & González Badillo, 2011). The MPV of the bar during the 30 repetitions performed with each set configuration was recorded using a linear encoder with a sampling rate of 1,000 Hz via a 3 m cable. The software automatically distinguished the eccentric and concentric phases of the full-squat exercise. The MPV was subsequently calculated by the software as the average velocity from the first positive velocity until the velocity of the bar became lower than gravity (Sanchez Medina et al., 2010).

Countermovement jump height. The reductions in CMJ height observed after each training set and after the whole training session were also used as mechanical measures of fatigue (Jimenez Reyes et al., 2016). CMJ height was measured at seven time points during the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations (3 sets were performed); 13 times in the TR2 set configuration (6 sets were performed); and three times in the CL4 set configuration (1 set was performed). At each measurement, three maximum CMJs separated by 5 s were performed, and the trial with the highest jump height was used for further analyses. Jump height was calculated with a contact platform (Chronojump, Barcelona, Spain) to the nearest of 0.1 cm from flight time measurements.

Blood Lactate concentration. Blood lactate concentration was used as a measure of metabolic fatigue. Blood lactate measurements were obtained from the fingertip 30 s after the completion of each set. Therefore, three measurements were taken in the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations (3 sets were performed), six measurements in the TR2 set configuration (6 sets were performed), and only one

measurement in the CL4 set configuration (1 set was performed). A portable lactate analyzer (Lactate Scout, SensLab GmbH, Leipzig, Germany) was used for lactate measurements. The lactate analyzer was calibrated before each exercise session according to the manufacturer's specifications.

Perceived exertion. The OMNI-Resistance Exercise Scale (OMNI-RES) of perceived exertion was used as a measure of perceptual fatigue (Robertson et al., 2003). Subjects were familiarized with the OMNI-RES scale during the familiarization session following the procedure described by Robertson et al. (Robertson et al., 2003). Specifically, subjects gave their rating of perceived exertion using the OMNI-RES scale after performing different level of effort. Immediately after finishing each set, the subjects gave their rating of perceived exertion using the OMNI-RES scale (0-10) where 0 is extremely easy and 10 represents extremely hard. An image of the OMNI-RES scale was shown to the subjects immediately after completing each set. Thus, the OMNI-RES scale was used on three occasions during the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations (3 sets were performed), six times in the TR2 set configuration (six sets were performed), and only once in the CL4 set configuration (1 set was performed).

7.2.6. Statistical analyses

Data are presented as mean \pm standard deviation. The normal distribution of the data was confirmed by the Shapiro-Wilk test ($P > 0.05$). The homogeneity of variances was assessed using Mauchly's sphericity test and the Greenhouse-Geisser correction was applied when the assumption of homogeneity of variances was violated. One-way repeated measures ANOVAs were conducted on the velocity attained at the first repetition of each set configuration, and on the CMJ height reached at the beginning of each testing session, to examine possible differences in physical readiness among the six set configurations. The differences in mechanical, metabolic and perceptual responses among the six set configurations were also examined through repeated measures ANOVAs. When significant F values were obtained, pairwise differences between means were tested using Least Significant Difference (LSD) post hoc procedures. Eta squared (η^2) was calculated for the ANOVAs where the values of the effect sizes 0.01, 0.06 and above 0.14 were considered small,

medium, and large, respectively (Cohen, 2013). Statistical tests were performed using the software package SPSS (version 22.0: SPSS, Inc., Chicago, IL, USA). Significance was set at $P \leq 0.05$.

7.3. RESULTS

The ANOVAs conducted on the velocity attained at the first repetition of each set configuration ($F = 2.2$, $P = 0.070$, $\eta^2p = 0.218$) and the CMJ height reached at the beginning of each testing session ($F = 1.5$, $P = 0.213$, $\eta^2p = 0.158$) were not statistically significant. The average CMJ height obtained at the beginning of each testing session was 37.7 ± 6.7 cm. The average MPV attained at the first repetition of the six testing sessions with the 10RM load (80.4 ± 13.1 kg) was 0.76 ± 0.03 m·s⁻¹.

7.3.1. Mechanical responses

Movement velocity The ANOVA conducted on each set configuration generally revealed main effects for set (MPV decreased with the number of sets; the only exception in which the main effect set was not significant was for the CL1 protocol) and repetition (MPV decreased with the number of repetitions), but their interaction only reached statistical significance for TR2 (Table 4). The magnitude of the velocity loss (%) observed within the training session differed between set configurations (Figure 5). The velocity loss at repetitions 5, 10, 15, 20, 25 and 30 of the training session significantly differed between the set configurations (Table 5), being CL2 and CL3 the protocols that were able to maintain higher velocities than the other set configurations. No significant differences in velocity loss were observed between CL2 and CL3.

Table 4. Two-way repeated measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2 and 3) and repetitions (1-10) on movement velocity during each set configuration.

Protocol	Set			Repetition			Interaction		
	F	P	η^2	F	P	η^2	F	P	η^2
TR1	12.7	0.001	0.613	227.3	<0.001	0.966	1.0	0.416	0.115
TR2	117.1	<0.001	0.936	44.6	<0.001	0.848	3.2	0.025	0.285
CL1	1.4	0.284	0.146	12.3	<0.001	0.606	0.6	0.903	0.069
CL2	22.8	<0.001	0.740	4.7	<0.001	0.372	0.7	0.813	0.080
CL3	6.6	0.008	0.454	3.9	<0.001	0.326	1.0	0.472	0.110
CL4				7.7	<0.001	0.489			

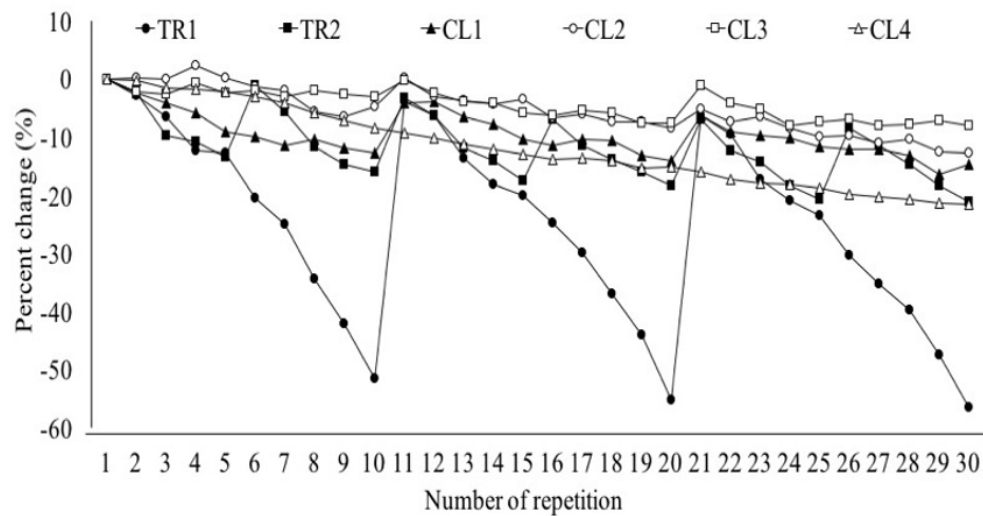
F, Snedecor's F; P, P-value; η^2 , partial eta squared. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 \times 10 [0 s]; TR2 = 6 \times 5 [0 s]; CL1 = 3 \times 10 [10 s]; CL2 = 3 \times 10 [15 s]; CL3 = 3 \times 10 [30 s]; CL4 = 1 \times 30 [15 s].

Table 5. Comparison of velocity loss (%) among the different set configurations.

	Repetition 5	Repetition 10	Repetition 15	Repetition 20	Repetition 25	Repetition 30
ANOVA	F = 6.3 P < 0.001 $\eta^2 = 0.441$	F = 61.6 P < 0.001 $\eta^2 = 0.885$	F = 11.8 P < 0.001 $\eta^2 = 0.596$	F = 70.9 P < 0.001 $\eta^2 = 0.899$	F = 6.2 P < 0.001 $\eta^2 = 0.436$	F = 70.2 P < 0.001 $\eta^2 = 0.898$
TR1 (%)	12.8 \pm 10.9 ^{d,f}	51.6 \pm 4.5 ^{b,c,d,e,f}	20.0 \pm 6.9 ^{c,d,e,f}	55.2 \pm 3.4 ^{b,c,d,e,f}	23.4 \pm 10.4 ^{c,d,e}	56.6 \pm 4.7 ^{b,c,d,e,f}
TR2 (%)	13.5 \pm 6.5 ^{d,e,f}	16.0 \pm 5.0 ^{a,d,e}	17.4 \pm 6.3 ^{c,d,e,f}	18.4 \pm 8.3 ^{a,d,e}	20.6 \pm 9.3 ^{c,d,e}	21.1 \pm 7.9 ^{a,c,d,e}
CL1 (%)	9.1 \pm 7.1 ^{d,f}	12.8 \pm 8.1 ^{a,e}	10.4 \pm 7.1 ^{a,b,d}	14.1 \pm 7.0 ^a	11.6 \pm 8.3 ^{a,b,f}	14.7 \pm 9.2 ^{a,b}
CL2 (%)	0.0 \pm 9.6 ^{a,b,c}	4.8 \pm 13.5 ^{a,b}	3.5 \pm 8.8 ^{a,b,c,f}	8.4 \pm 12.3 ^{a,b}	9.9 \pm 9.8 ^{a,b,f}	12.8 \pm 8.5 ^{a,b,f}
CL3 (%)	2.4 \pm 5.1 ^b	3.0 \pm 3.1 ^{a,b,c,f}	5.8 \pm 6.1 ^{a,b,f}	7.6 \pm 5.8 ^{a,b,f}	7.4 \pm 7.7 ^{a,b,f}	7.9 \pm 6.1 ^{a,b,f}
CL4 (%)	2.2 \pm 3.4 ^{a,b,c}	8.5 \pm 4.6 ^{a,c}	12.9 \pm 3.9 ^{a,b,d,e}	15.0 \pm 4.9 ^{a,e}	18.8 \pm 5.8 ^{c,d,e}	21.5 \pm 6.3 ^{a,d,e}

F, Snedecor's F; P, P-value; η^2 , partial eta squared. ^a, significantly different than TR1; ^b, significantly different from TR2; ^c, significantly different from CL1; ^d, significantly different from CL2; ^e, significantly different from CL3; ^f, significantly different from CL4. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 \times 10 [0 s]; TR2 = 6 \times 5 [0 s]; CL1 = 3 \times 10 [10 s]; CL2 = 3 \times 10 [15 s]; CL3 = 3 \times 10 [30 s]; CL4 = 1 \times 30 [15 s].

Figure 10. Velocity loss observed for six set configurations analyzed. Results are presented as percent change from the first repetition of each testing session. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 \times 10 [0 s]; TR2 = 6 \times 5 [0 s]; CL1 = 3 \times 10 [10 s]; CL2 = 3 \times 10 [15 s]; CL3 = 3 \times 10 [30 s]; CL4 = 1 \times 30 [15 s].



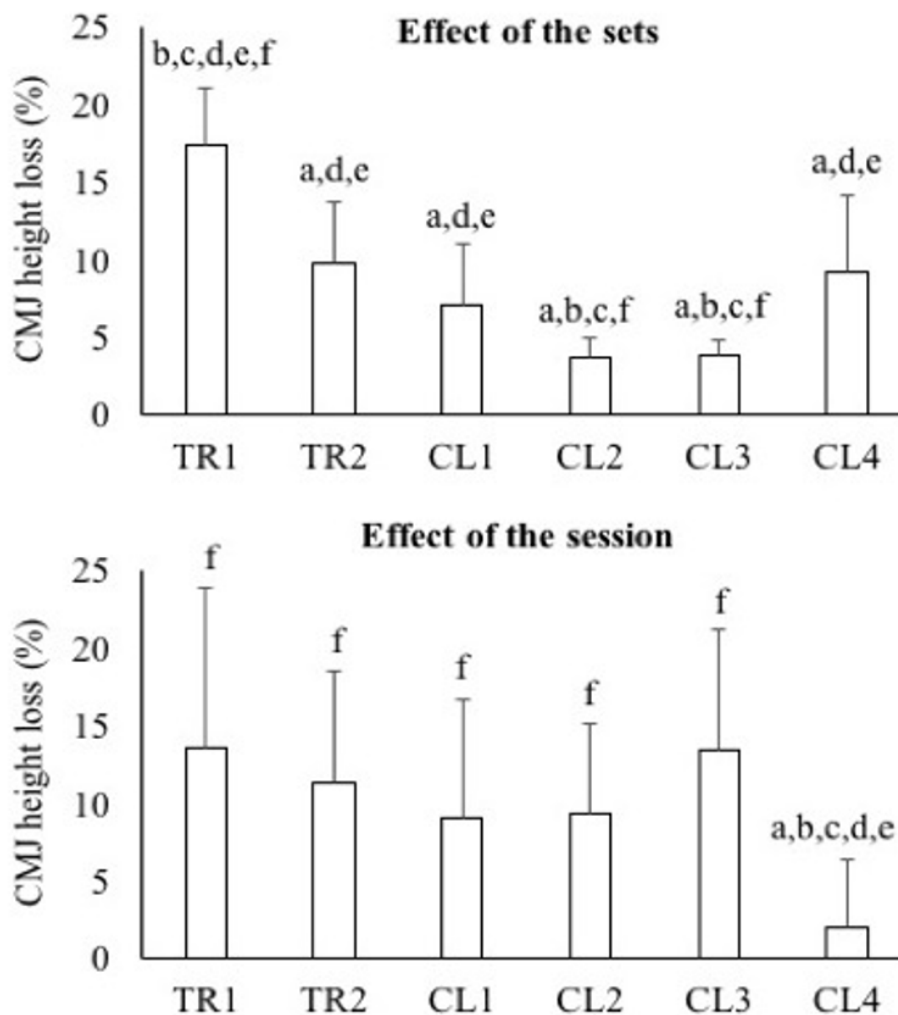
CMJ height Regardless of the set configuration analyzed, significant main effects for set (CMJ height decreased with the number of sets; the only exception in which the main effect set was not significant was for the CL1 protocol) and time (lower CMJ height after the fatigue protocol) were observed, however their interactions did not show statistical significant differences (Table 6). The percent change of the CMJ height after the different sets performed in a session were averaged and then compared with the other set configurations via a one-way ANOVA of repeated measures ($F = 23.2$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.743$). The magnitude of CMJ height loss after each set was TR1 > TR2, CL1 and CL4 > CL2 and CL3 (Figure 11). Finally, the ANOVA conducted to evaluate the effect of the whole training session on the percent change of CMJ height revealed significant differences between set configurations ($F = 3.6$ $P = 0.009$, $\eta^2p = 0.308$). The reduction in CMJ height was significantly lower in the CL4 protocol when compared to TR1, TR2, CL2 and CL3 (Figure 11).

Table 6. Two-way repeated measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2 and 3) and the time of measurement (pre-set and post-set) on countermovement jump height.

Protocol	Set			Time			Interaction		
	F	P	η^2	F	P	η^2	F	P	η^2
TR1	40.9	<0.001	0.836	87.8	<0.001	0.917	2.6	0.102	0.248
TR2	13.2	<0.001	0.622	48.0	<0.001	0.857	0.6	0.673	0.074
CL1	2.8	0.094	0.256	21.3	0.002	0.727	0.3	0.723	0.040
CL2	7.4	0.005	0.480	53.9	<0.001	0.871	0.9	0.431	0.100
CL3	29.8	<0.001	0.788	90.6	<0.001	0.919	0.0	0.985	0.002
CL4				21.9	0.002	0.732			

F, Snedecor's F; P, P-value; η^2 , partial eta squared. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 \times 10 [0 s]; TR2 = 6 \times 5 [0 s]; CL1 = 3 \times 10 [10 s]; CL2 = 3 \times 10 [15 s]; CL3 = 3 \times 10 [30 s]; CL4 = 1 \times 30 [15 s].

Figure 11. Countermovement jump (CMJ) height loss observed after the training sets (top panel) and the whole training session (low panel) in the six set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 \times 10 [0 s]; TR2 = 6 \times 5 [0 s]; CL1 = 3 \times 10 [10 s]; CL2 = 3 \times 10 [15 s]; CL3 = 3 \times 10 [30 s]; CL4 = 1 \times 30 [15 s].

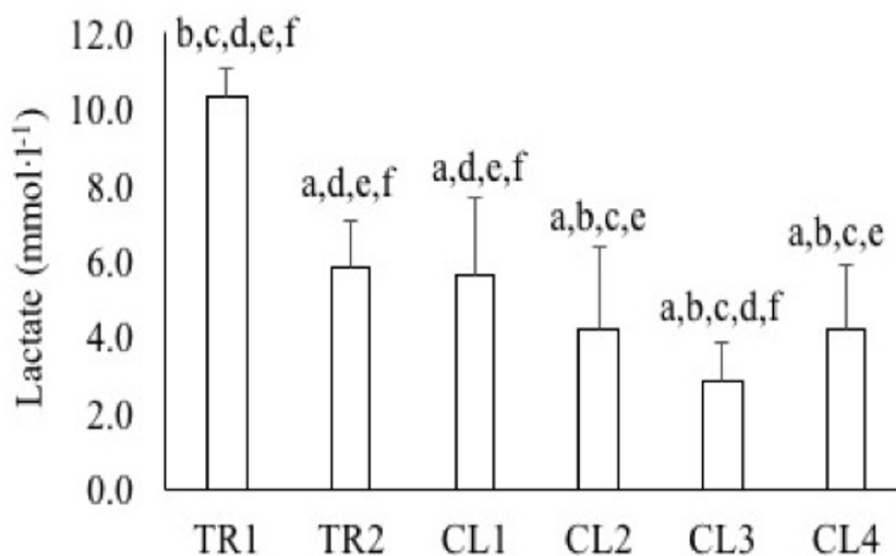


7.3.2. Metabolic responses

The ANOVA that compared blood lactate concentrations between the training sets was only significant for TR1 ($F = 107.3$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.931$). Blood lactate concentration significantly increased with the number of sets (set 1 = 8.5 ± 0.8 mmol·l⁻¹; set 2 = 10.6 ± 0.9 mmol·l⁻¹; set 3 = 11.8 ± 0.9 mmol·l⁻¹).

Blood lactate concentration, which was averaged among the different training sets, significantly differed between the set configurations ($F = 46.4$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.853$). Post-hoc comparisons revealed that the set configurations could be ranked as follows based on the blood lactate concentration: TR1 > TR2 and CL1 > CL2 and CL4 > CL3 (Figure 12).

Figure 12. Comparison of blood lactate concentration among the different set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets × repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3 × 10 [0 s]; TR2 = 6 × 5 [0 s]; CL1 = 3 × 10 [10 s]; CL2 = 3 × 10 [15 s]; CL3 = 3 × 10 [30 s]; CL4 = 1 × 30 [15 s].

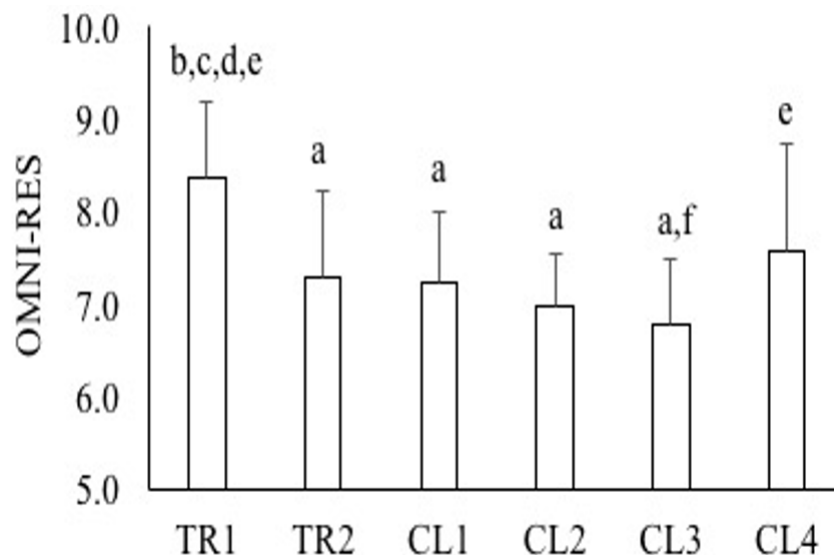


7.3.3. Perceptual responses

OMNI-RES values significantly differed between training sets for all set configurations (TR1: $F = 41.4$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.838$; TR2: $F = 18.5$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.698$; CL1: $F = 25.1$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.758$; CL2: $F = 6.8$, $P = 0.028$, $\eta^2p = 0.460$; and CL3: $F = 5.5$, $P = 0.042$, $\eta^2p = 0.407$). Post-hoc comparisons revealed that OMNI-RES values increased with the number of sets.

OMNI-RES values were averaged over the different sets in each session and then compared with a one-way ANOVA for repeated measures ($F = 6.8$, $P < 0.001$, $\eta^2p = 0.461$). The post-hoc comparisons revealed significant differences between set configurations as follows: TR1 > CL4 > TR2, CL1, CL2 and CL3 (Figure 13).

Figure 13. Comparison of OMNI-RES vales among the different set configurations. a, significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4. Sets \times repetitions [inter-repetition rest]: TR1 = 3×10 [0 s]; TR2 = 6×5 [0 s]; CL1 = 3×10 [10 s]; CL2 = 3×10 [15 s]; CL3 = 3×10 [30 s]; CL4 = 1×30 [15 s].



7.4. DISCUSSION

In the present study we explored the effect of different set configurations on mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue during multiple sets in the full-squat exercise performed with the 10RM load. Our main findings are: 1) the CL2 and CL3 set configurations (15 and 30 s inter-repetition rest, respectively) were able to maintain greater velocities during the training; 2) while CL2 and CL3 were also the set configurations that produced lower CMJ height loss after each training set, the CL4 (i.e., 1 set of 30 repetitions with 15 s of inter-repetition rest) was the set configuration that induced a lower CMJ height loss after the whole training session; 3) longer inter-repetition rest periods were associated with lower lactate concentrations; and 4) CL4 and especially TR1 were the two set configurations associated with greater perceptual fatigue. These results indicate that for a training session with the same volume (30 repetitions) and relative load (10RM), the implementation of different cluster configurations is effective in influencing mechanical, metabolic, and perceptual responses.

Regardless of the set configuration, the number of sets and repetitions were associated with a reduction in MPV. However, the magnitude of velocity loss differed between different set configurations. When compared to the most commonly applied set configuration (i.e., TR1: repetitions performed until muscular failure), all the remaining set configurations, and especially CL2 and CL3, were able to maintain higher values of MPV throughout the session. These results are in agreement with previous studies that have shown that the magnitude of velocity loss can be considerably attenuated by reducing the level of effort of the training set (Oliver et al., 2015a; Sánchez Medina & González Badillo, 2011), as well as by introducing brief rest periods between successive repetitions (García Ramos et al., 2016, 2015; Haff & Stone, 2003; Hansen, Cronin, & Newton, 2011; Hardee, Triplett, et al., 2012; Tufano, Conlon, Nimphius, Brown, Seitz, Williamson, & Haff, 2016). In line with Hardee et al. (Hardee, Triplett, et al., 2012), who reported similar values of power output in the power clean exercise when 20 and 40 s of inter-repetition rest were implemented, our results indicate that CL2 (15 s inter-repetition rest) and CL3 (30 s inter-repetition rest) set configurations are equally effective in maintaining

MPV within the training session. It should be noted that 15 s of inter-repetition rest could be preferable to 30 s because it markedly reduces training session durations.

We also observed a reduction in CMJ height as a consequence of the increment in the number of sets, as well as after the performance of each training set. In line with the results obtained for MPV, the greatest CMJ height loss was obtained after TR1, while CL2 and CL3 showed the lowest reduction in CMJ height immediately after completing each training set. These results further support the use of CMJ height loss to quantify neuromuscular fatigue (Jimenez Reyes et al., 2016; Morcillo et al., 2015; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Surprisingly, the lowest reduction in CMJ height after the completion of the training session was observed after CL4 (i.e., 1 set of 30 repetitions with 15 s of inter-repetition rest). Although speculative, we suggest the possible influence of a post-activation potentiation (PAP) phenomenon that counteracted the negative influence of fatigue during recovery, thus minimizing the CMJ height loss after CL4 (Boullosa et al., 2013). Further studies should evaluate the influence of different set configurations on the PAP/fatigue balance at different time points during recovery for better design of complex training sessions.

The effect of the number of sets on blood lactate concentration was different than that observed with regard to mechanical responses. The performance of successive sets induced an increment in blood lactate concentration after TR1, but no significant changes were observed after the remaining set configurations. This result indicates that 5 min of inter-set rest was enough to minimize metabolic stress between successive sets in all the set configurations analyzed, with the exception of TR1. In agreement with previous studies, the inclusion of longer rest periods between repetitions was associated with lower lactate concentrations (Girman et al., 2014; Iglesias Soler et al., 2012). It should be noted that metabolic stress is deemed one of the main mechanisms responsible for muscle hypertrophy (Brad Schoenfeld, 2013); consequently, the lower metabolic stress induced by cluster set configurations could be detrimental to the induction of hypertrophic adaptations (Girman et al., 2014; Oliver et al., 2015b). In this regard, CL2 (15 s inter-repetition rest) may be preferable to CL3 (30 s inter-repetition rest) because it induced greater metabolic stress but similar mechanical performance. Further studies should

verify whether differences in acute metabolic responses are related to different hypertrophy levels in the long term with different set configurations.

Finally, in agreement with the results obtained for the mechanical variables, the number of sets was associated with an increase in perceived fatigue (i.e., higher OMNI-RES values) in all the set configurations analyzed. As expected, TR1 was associated with the highest perceptual fatigue. However, contrary to the results obtained from both mechanical and metabolic variables, CL4 was the second most perceptually fatiguing set configuration, while no differences were observed between the other four set configurations (TR2, CL1, CL2, and CL3). Although the higher perceived fatigue in TR1 and CL4 could be attributed to their shorter training sessions (11.5 and 8.75 min, respectively; see Figure 19), previous studies have also shown that cluster set configurations induce lower perceived fatigue when the total session duration is equalized with respect to traditional continuous repetition training (Mayo et al., 2014). Overall, these results confirm the usefulness of different cluster set configurations when the objective is to reduce the perceived degree of effort (Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012; Mayo et al., 2014). However, although it was effective in terms of low levels of mechanical and metabolic fatigue, CL4 (a set of 30 repetitions with 15 s inter-repetition rest) may not be suitable for novice subjects since it was perceived as very stressful compared to other cluster set configurations.

One strength of the present study was that the 10RM load was adjusted on a per session basis. This decision was justified as a training-related effect would be expected to be induced by the successive testing sessions, in addition to the inherent differences in physical readiness that may occur on a daily basis (González Badillo et al., 2017; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). The non-significant differences in the MPV attained at the first repetition in each testing session show that the relative load was similar for all six set configurations (González Badillo & Sanchez Medina, 2010). In addition, the absence of significant differences in the CMJ height achieved at the beginning of each session indicates that the physical readiness of the subjects was similar in all of them. Cluster training studies have used protocols with brief rest periods introduced between individual repetitions or group of repetitions. While in the present study we explored the effect of introducing

brief rest periods between single repetitions, future studies should explore the effect of introducing rest periods after groups of two or three continuous repetitions.

In conclusion, all cluster set configurations proved to reduce the mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue observed during multiple sets in the full-squat exercise performed against the 10RM load. All the cluster set configurations evaluated in the present study allowed the maintenance of greater MPV when compared to the traditional set configuration.

7.5. PRACTICAL APPLICATIONS

Based on the results of the present study, CL2 (15 s inter-repetition rest) and CL3 (30 s inter-repetition rest) were the two set configurations that minimized mechanical fatigue (movement velocity and CMJ height loss). Additionally, perceptual fatigue did not differ between CL2 and CL3. Therefore, since CL2 reduces training session durations and promotes similar metabolic stress, we would recommend the application of 15 s of inter-repetition rest over the rest of the cluster set configurations evaluated in the present study.

7.5.1. Conflict of Interest Statement

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

7.5.2. Acknowledgments

We are very grateful to the subjects who participated in this study for their involvement. The authors sincerely thank Raul Andrés López and Antonio García-Peñuela for their participation in the measurement sessions and valuable participation during the process. We also thank Dr. David G. Behm for the English revision of the manuscript.

VIII

Estudio II

VIII/ ESTUDIO II



antioxidants



Article

Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow, and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva

Jorge M. González-Hernández ^{1,2,*†}, Lorena Franco ^{3,†}, David Colomer-Poveda ¹,
 Silvia Martínez-Subiela ³, Ramón Cugat ⁴, José J. Cerón ³, Gonzalo Márquez ¹,
 Luis M. Martínez-Aranda ¹, Pedro Jimenez-Reyes ⁵ and Asta Tvarijonavičiute ³

¹ Neuromove Research Group, Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio (UCAM), Campus de los Jerónimos, 30107 Murcia, Spain; dcolomer@ucam.edu (D.C.-P.); gmarquez@ucam.edu (G.M.); lmmartinez2@ucam.edu (L.M.M.-A.)

² Faculty of Health Science, Universidad Europea de Canarias, la Orotava, 38300 Tenerife, Spain

³ Interdisciplinary Laboratory of Clinical Analysis, University of Murcia, 30100 Murcia, Spain; lorena.franco2@um.es (L.F.); silviam@um.es (S.M.-S.); jjceron@um.es (J.J.C.); asta@um.es (A.T.)

⁴ Garcia Cugat Foundation, 08023 Barcelona, Spain; montse.garcia@sporttrauma.com

⁵ Centre for Sport Studies, Rey Juan Carlos University, Fuenlabrada, 28943 Madrid, Spain; Peterjr49@hotmail.com

* Correspondence: jormigohe91@gmail.com

† These authors contributed equally to this work.

Received: 26 July 2019; Accepted: 6 September 2019; Published: 11 September 2019



Abstract: Uric acid (UA) is the most abundant antioxidant compound in saliva and one of the most sensitive biomarkers for detecting changes in the oxidative status of the organism. The aim of this study was to evaluate the effect of: (i) different methods of saliva sampling and (ii) the correction by salivary flow or total protein on UA concentrations in saliva. Paired saliva (collected by two different methods, passive drooling and using Salivette cotton rolls) and serum samples were obtained from 12 healthy men after the performance of two resistance training exercises of different level of effort that can produce different concentrations in UA in saliva. There were no significant differences between values of uric acid in saliva using Salivette and passive drool. Correlations between UA in serum and saliva and increases in UA in saliva after exercise were detected when saliva samples were obtained by passive drool and Salivette and were not corrected by salivary flow or total protein concentration. Therefore for UA measurements in saliva it would not be recommended to normalize the results by salivary flow or protein concentration. This study highlights the importance of choosing an adequate sampling method selection as well as the expression of results when analytes are measured in saliva.

Keywords: squat; salivettes; biomarkers; oxidative stress

1. Introduction

Saliva, as a sample where different biomarkers which can be easily measured, has attracted attention of the scientific community in recent years. The easy and painless collection are the main advantages of using saliva compared to serum use. In addition, it is a non-invasive procedure allowing its use in field conditions and repeated sampling [1], producing minimum discomfort and anxiety.

Saliva has an antioxidant system consisting of various metabolites and enzymes [2]. For this reason, saliva has been used to investigate possible changes in the oxidative status associated with different

8.1. INTRODUCTION

Saliva, as a sample where different biomarkers which can be easily measured has attracted attention of the scientific community in recent years. The easy and painless collection are main advantage of using saliva compared to serum use. In addition, it is a non-invasive procedure allowing its use in field conditions and repeated sampling (Wong, 2006), producing a minimum discomfort and anxiety.

Saliva has an antioxidant system consisted of various metabolites and enzymes (Gonzalez et al., 2008). For this reason, saliva has been used to investigate possible changes in the oxidative status associated with different conditions, such as oral diseases (Bahar, Feinmesser, Shpitzer, Popovtzer, & Nagler, 2007; Guentsch et al., 2008), systemic diseases (e.g. diabetes (Arana et al., 2006) or renal failure (Bibi & Nagler, 2008)) and physical efforts (Deminice et al., 2010). Uric acid (UA) is the most important antioxidant molecule in saliva, contributing around 70% of the total salivary antioxidant capacity (Battino et al., 2002) and being able to chelate transition of metals and to react with biological oxidants such as hydroxyl radicals, hypochlorous acid and reactive nitrogen species (Kuzkaya, Weissmann, Harrison, & Dikalov, 2005). In a previous report, UA was the only analyte showing a significant change when a panel of oxidative stress biomarkers was measured in saliva after an acute session of resistance exercise. Therefore, UA is one of the most important biomarkers that should be analyzed in saliva in order to evaluate oxidative stress (Deminice et al., 2010).

One of the causes that can produced changes in the oxidative status and increases in UA is the resistance training (RT), which is a physical exercise modality allowing the modification of variables such as number of sets, repetitions or rest time [14, 19]. Training to failure (TF) is characterised by the inability to complete a concentric phase due to the high level of fatigue (Drinkwater et al., 2005; Brad J. Schoenfeld et al., 2017). On the other hand, training consisted of number of repetitions that are less than achievable maximum is known as training not leading to failure (TNLF) and has been shown to produce less fatigue and similar or even better adaptations than TF (Folland et al., 2002).

The features of the device used for sampling, as well as the way the analytes are expressed in saliva, may influence the results. For example, Salivette cotton rolls significantly increase salivary testosterone and estradiol levels (Celec & Ostatníková, 2012) and in the specific case of dehydroepiandrosterone, the cotton interference effect is of sufficient magnitude to attenuate the association between serum and saliva levels (Shirtcliff, Granger, Schwartz, & Curran, 2001). On the other hand, in some analytes, such as the salivary alpha-amylase (sAA), the use of normalized values by considering salivary flow or protein concentration can produce variability in the results of sAA in different stress models, compared with the results expressed without any correction (Contreras Aguilar et al., 2017). Saliva has been collected for measuring levels of UA by different methods, such as flow stimulation by chewing on paraffin (Gonzalez et al., 2008) using a cotton roll (Chielle, Casarin, Chielle, & Casarin, 2017) or without stimulation (Kondakova, Lissi, & Pizarro, 1999). However, there are no comparative studies about whether different sampling and normalization procedures might affect the UA values in saliva. Therefore, the main objective of this study was to evaluate how two different sampling conditions (using passive drool or Salivette with cotton) and three different normalization procedures (without any correction, corrected by salivary flow or corrected by total protein concentration) could influence the measured values of UA in saliva. For this purpose, the effect of different sampling conditions and normalization procedures in saliva on UA concentrations and their correlations with serum values, were evaluated in saliva samples that were obtained by two experimental models of acute exercise (TLF and TNLF) in order to get samples with different UA concentrations.

8.2. MATERIALS AND METHODS

8.2.1. Experimental Approach to the Problem

Two different squat resistance-training protocols were designed to obtain samples with different UA concentrations. Prior to the protocol performance, two familiarization sessions with saliva extraction and full squat technique training were performed, in addition to the 10 repetition maximum (10 RM) load determination (Sánchez Medina & González Badillo, 2011). First protocol included

6 sets of 10 repetitions (TF), while the second one included 6 sets of 5 repetitions (TNLF), both with 5 minutes of interest rest and same external load corresponding to 10 repetition maximum (RM). Subjects performed two different protocols in a counterbalanced order during two consecutive weeks. Moreover, all training sessions were supervised by a strength and conditioning specialist, in order to ensure the correct performance of the exercise. On the other hand, saliva sampling was made by two different procedures, passive drool and salivette cotton roll both during 1 min. Saliva results were expressed without any correction and corrected by salivary flow rate, and total protein.

8.2.2. Subjects

Twelve trained males (age 23.5 ± 3.5 years, height 1.77 ± 0.10 m and body mass 73 ± 7.2 kg), volunteered to participate in this study. The criteria of inclusion were the absence of any health problems or musculoskeletal injuries and also the absence of ingestion of any drug in the last six months. Participants were fully informed of any possible risks and discomforts associated with experimental procedures and provided a written informed consent to participate in this study, which was approved by the local ethical committee in agreement with the Declaration of Helsinki.

8.2.3. Procedures

Three training sessions were performed starting with a pre-test, followed by two post-tests days (24 and 48h). First, pre-saliva and pre-serum extractions were carried out in fasting conditions. Afterwards, subjects had a breakfast (juice and a toast with tomato and olive oil). One hour later, they did a standardized warm-up protocol, followed by training sessions of 50-60 min (including warm-up) which were supervised by researchers specialized in strength and conditioning training. Every session was performed in the morning at the same schedule for each individual (± 1 h), under constant environmental conditions (20 °C and 60% humidity).

Saliva and blood were sampled at four different times. First sample corresponding with baseline was taken at 8:30 AM. The second saliva and blood sample were collected 60 min post-training. Finally, the third and fourth extraction corresponded with 24 and 48h post-training. The order of collection was saliva by passive flow first, followed by collecting saliva using salivette and finally blood sample was collected. Participants were not allowed to eat, drink coffee or caffeinated soft drinks, and consume dairy products one hour before collecting saliva samples. Furthermore, five minutes prior to saliva collection participants were asked to rinse their mouth with clear water to avoid contaminations.

Specifically, saliva was collected applying two different procedures (i) passive flow during 1 min under supervision, using 5 mL standard microcentrifuge polystyrene tubes with round bottoms (12 X 75 mm) (Deltalab, 5 ml, Barcelona, Spain) (Contreras Aguilar et al., 2017), (ii) salivette cotton roll (Sarstedt, Nümbrecht, Germany). Salivette rolls were chewed for 1 min and then placed into special centrifugation tubes. Each sample was refrigerated or stored on ice until arrival to the laboratory which was no longer than 45 minutes after sample collection. All the samples were firstly weighed and then centrifuged at $4.500 \times g$ for 10 min at 4°C . The supernatant from whole saliva samples obtained by passive flow and saliva samples from the Salivettes were transferred to the 1.5 mL eppendorf tubes and stored at -80°C until analysis. In all cases the volume of saliva obtained was 1 mL minimum.

After saliva collection, blood extractions were performed from the antecubital vein (5ml) into one plane tube to get serum (approximately 2 mLs) that was stored at -80°C until analysis.

UA was measured using a colorimetric commercial kit (Uric acid, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA) following the International Medicine (IFCC) method. This assay showed in saliva and serum less than 10% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution.

Salivary flow rate was obtained by dividing the volume of saliva by the time of the sampling period (1 min) (Contreras Aguilar et al., 2017; Rohleder & Nater,

2009). Saliva volume was obtained by subtracting the empty tube weight from the saliva-filled one, and values in grams obtained were considered equivalent to milliliters. UA amount was later multiplied by flow rate (mg/min).

Saliva total protein quantification (Prot.T) expressed in mg/mL was done through a commercially available colorimetric kit for measuring urine and Low-Complexity Region (LCR) proteins (Protein in urine and CSF, Spinreact, Spain). This assay showed in saliva less than 15% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution. To express the values of UA normalized by protein content, in each sample the results from UA were divided by its total protein value (mg/mg).

8.2.4. Statistical analyses

Data are presented as Mean (interquartile range). Data distribution was examined for normality using the D'Agostino & Pearson omnibus normality test. When data was not normally distributed, non-parametric tests were used. Uric acid values obtained in serum, and saliva using salivette and passive drool methodologies were compared using Friedman test followed by Dunn's multiple comparison test. Correlation between different variables were evaluated using Spearman correlation test. Statistical analyses were performed using a computer software (Graph Pad Prism Version 7 for Windows, Graph Pad software, La Jolla, CA). The level of significance was set at $P < 0.05$.

A post hoc power analysis was conducted using the values obtained to verify the null hypothesis. By using the mean and standard deviation of uric acid for basal time and after 60 minutes of exercise, and a power of 80 % with at 5% level of significance, the number of individuals were calculated. The data analysis was done using ClinCal statistic analyser software.

8.3. RESULTS

The power analysis test indicates that 10 subjects were required in order to obtain a power of 80% with a 5% level of significance.

Results of UA concentrations in serum and saliva when collected with Salivette or by passive drool, corrected either by salivary flow rate, by total protein concentration or without any correction are shown in Table 7.

Table 7. Mean (interquartile range) data of serum and salivary UA before (Pre) and after 60 min (Post_60), 24 hours (Post_24), and 48 hours (Post_48) of acute exercise. TLF: training leading to failure, TNLF: training not leading to failure, TP: total proteins

	TLF (6x10)				TNLF(6x5)			
	Pre	Post_60	Post_24	Post_48	Pre	Post_60	Post_24	Post_48
Serum (mg/dL)	5,36 (4,08 - 6,61)	5,92 (4,85 - 6,99) *	5,97 (4,58 - 6,81) **	5,58 (4,34 - 6,18)	4,98 (4,18 - 6,28)	4,81 (4,22 - 6,14)	5,37 (4,27 - 6,16)	5,38 (3,87 - 5,92)
Salivette (mg/dL)	2,10 (1,76 - 3,11)	2,73 (2,25 - 3,53) *	2,23 (1,44 - 2,62)	2,17 (1,88 - 3,14)	1,74 (1,61 - 2,42)	1,97 (1,56 - 2,77)	1,99 (1,50 - 2,57)	2,29 (1,66 - 3,00) *
Salivette x Flow rate (mg/min)	4,16 (3,14 - 5,49)	4,98 (3,52 - 6,84) *	3,01 (2,42 - 5,13)	4,09 (2,92 - 5,71)	3,64 (3,14 - 4,49)	5,10 (3,10 - 6,62) **	3,15 (2,51 - 4,31)	3,98 (3,50 - 4,82)
Salivette /TP (mg/mg)	5,80 (5,08 - 6,83)	3,65 (2,28 - 4,35) *	5,05 (3,15 - 6,98)	4,65 (3,40 - 5,85)	6,64 (4,98 - 8,89)	2,64 (1,91 - 4,64) ***	4,67 (3,49 - 9,01)	5,47 (4,41 - 8,06)
Passive drool (mg/dL)	2,47 (1,30 - 3,07)	2,77 (1,86 - 4,85) *	2,52 (1,48 - 2,84)	2,28 (0,96 - 2,51)	1,92 (1,02 - 2,69)	2,40 (1,27 - 2,95) *	1,86 (1,46 - 2,56)	1,73 (1,33 - 2,64)
Passive drool x flow rate (mg/min)	2,54 (1,16 - 4,41)	4,51 (1,80 - 8,89) *	3,57 (1,58 - 4,14)	2,15 (0,90 - 3,81)	1,80 (1,24 - 3,02)	1,75 (1,21 - 4,03)	2,20 (1,37 - 3,78)	2,27 (1,27 - 3,56)
Passive drool/TP (mg/mg)	6,61 (3,37 - 8,58)	5,86 (3,19 - 9,15)	5,68 (2,86 - 10,40)	4,42 (2,31 - 16,6)	1,92 (1,02 - 2,69)	2,40 (1,27 - 2,95) *	1,86 (1,46 - 2,56)	1,73 (1,33 - 2,64)

* P<0,05 **P<0,01, ***P<0,001 vs. Pre of the same group.

A significant increase in serum values of UA was detected at 60 min. ($p=0.011$) and 24 hours ($p=0.009$) after the TF protocol. However, no significant changes in serum uric acid were detected at any time after the TNFL protocol, although there was a tendency to increase at 24 and 48 hours.

In saliva, significant increases in UA concentration without any correction were found at 60 minutes after TF protocol with the two tested sampling methods (Salivette, $p=0.017$ and passive drool, $p=0.021$). When values were corrected by salivary flow, an increase at 60 minutes was also found after the TF protocol with the same two sampling methods (Salivette, $p=0.032$ and passive drool, $p=0.01$). After correction by total protein, a decrease in the values of UA after TF was found.

After TNLF protocol, UA concentrations increased in saliva at 60 min ($p=0.011$) when using passive drool, but a decreament was noticed when the values were corrected by salivary flow rate. Salivette method revealed an increase in UA at 48 hours ($p=0.026$), and this change was not observed when the results were corrected by flow or total protein concentration. Even after correction by total protein, a decrease in the values of UA after TF was found.

In Table 8 appears the comparison between uric acid values obtained in serum and in saliva using salivette and passive drool. There were no significant differences between values of uric acid in saliva using salivette and passive drool.

Table 8. Comparison between uric acid values obtained in serum and in saliva using salivette and passive drool

	Serum	Salivette	Passive drool
Uric Acid, mg/dL	5.38 (4.25 - 6.36)	2.11 (1.67 - 2.76) *	2.17 (1.40 - 2.84) *

* $P<0.001$ vs. levels in serum.

Correlation analysis results are depicted in Table 9. Data analysis revealed a low but significant correlation between serum and saliva UA values obtained with Salivette methods and expressed without any correction ($r=0.4344$; $p<0.001$) and with saliva values obtained by passive drool and expressed without any correction ($r=0.3728$; $p=0.031$).

Table 9. Correlation data between uric acid in serum and saliva.

	Spearman r	95% Confidence Interval	P value
Salivette	0,4344	0,2506 – 0,5880	<0,001
Salivette flow	0,1795	-0,02787 – 0,3720	0,080
Salivette/ TP	0,1676	-0,04009 – 0,3614	0,102
Passive drool	0,3728	0,07919 – 0,4605	0,031
Passive drool Flow	0,3541	0,1131 – 0,4871	0,089
Passive drool/ TP	0,09	-0,3365 – 0,4859	0,170

8.4. DISCUSSION

In this study we evaluated whether the sampling and normalization procedure may influence the results of UA in saliva. We used the RT model since it has been previously reported that this procedure of acute exercise increases UA in saliva (Deminice et al., 2010). The rationale for including two resistance exercise protocols of different intensity in this study is because we postulated that the different intensity could produce different values of UA in saliva. Therefore, with this design we were able to study how the procedures of saliva collection and normalization of values behave in a wide range of UA values.

We used a commercially available assay for the UA measurements in saliva since it was easy and cheap to obtain and set-up. This assay provided adequate results of imprecision and linearity under dilution when validated in saliva and serum and did not require any modification for the salivary measurements compared to serum.

Our results showed that TF protocol produced a significant increase in serum and saliva UA at 60 min and 24 hours post-training, being recovered after 48 hours of exercise cessation. This is in agreement with a previous report (Deminice et al., 2010), where authors reported salivary and serum UA increment 10 minutes after an acute bout of RT performed against 75% of one repetition maximum (10 reps. X 3 sets). In contrast, we did not observe any significant increase in serum after the TNLF protocol. The increase of UA after intense exercise could be due to an increased purine oxidation and subsequent UA production (Gonzalez et al., 2008) but it could be also protective in terms of increased antioxidant capacity of the saliva. According to our results, it can be postulated that the exercise representing maximum effort (TF) leads to a significant and fast increase of UA in serum which tends to decrease after 24 hours. However, a less fatiguing protocol (such as TNLF) seems to produce lower rates of oxidative stress. Overall, the TF model allowed us to evaluate our procedures of saliva collection and normalization with different UA values.

Concerning the sampling and normalization procedures, our results revealed that values of UA in saliva obtained with Salivette and passive drool and without any correction showed a moderate correlation with serum. These results are in agreement with the ones obtained in the previous reports where Salivette were used in 54 individuals with normal weight (Chielle et al., 2017) and in study with 83 subjects where passive drool was used (Riis et al., 2018). However, the correlation coefficient (r) that we obtained was lower than the one reported by Kondakova et al. (1999) ($r=0.76$). These differences could be related to different conditions of the assays used or the existence of a different dynamic in the UA response to exercise in serum than in saliva. Overall, it would be desirable to evaluate a larger population to assess the correlations between passive drool and Salivette with serum. In addition, in case of using other ways of obtaining saliva such as ascorbic acid stimulation, it would be of interest to evaluate, its possible effect on UA specially taking in consideration that ascorbic acid is an antioxidant agent.

The use of Salivette has been previously recommended in some studies since by using the rolls and after centrifugation, the saliva contains less mucins and loses viscosity, making sample processing easier (Lamey & Nolan, 1994). However it can

alter the composition of some analytes, and therefore the number of analytes that can be measured with this procedure is limited (Celec & Ostatníková, 2012; Kruger, Breunig, BiskupekSigwart, & Dorr, 1996). In our study no differences were found between the use of salivette and passive drool in UA in saliva, so apparently both methods could be used for UA measurements.

Regarding the different normalization procedures used in this study, non-corrected UA values showed the highest correlation with serum. When the results were corrected by flow or total protein concentration, the changes on UA after exercise were generally not correlated to those obtained in serum. This is in agreement with a previous study where uncorrected values described more accurately the changes observed in saliva alpha-amylase under different experimental conditions (Contreras Aguilar et al., 2017). Therefore, our results reinforce previous recommendations about not normalizing sample to protein concentration in saliva when assessing level of physical stress or exertion. However, our findings should be also interpreted carefully since they have been obtained in specific experimental conditions and their generalization could be highly speculative. Furthermore, researchers interested in using UA measurements in saliva in other exercise protocols or clinical situations may also be well advised to reassess these comparisons as a pilot study in the laboratory using own assay conditions and experimental procedures

8.5. CONCLUSION

Overall, this report highlights the importance of an adequate sampling method selection as well as the expression of results when analytes are measured in saliva, and also to stress the need to follow standardized sampling and procedures to give the analytical results in these situations. It is important to point out that the use of saliva for UA measurements can have important practical applications. By monitoring the UA in saliva, situations in which there is an increase in oxidative stress can be detected and identified and appropriate measures could be taken in order to reduce or compensate the oxidative stress status. Therefore, saliva can be easily used for routine evaluation of the UA level if sample is properly collected and result adequately expressed.

Acknowledgements: The authors thank all subjects who participated in this study. They also show appreciation to the Garcia Cugat Foundation for their support in conducting the present experiment.

IX

Estudio III

IX/ ESTUDIO III

SPORTS BIOMECHANICS
<https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1766102>

 **Routledge**
 Taylor & Francis Group

 Check for updates

Effect of different interset rest intervals on mean velocity during the squat and bench press exercises

Jorge M. González-Hernández ^{a,b}, Pedro Jimenez-Reyes ^c, Danica Janicijevic^d, James J. Tufano ^e, Gonzalo Marquez ^a and Amador Garcia-Ramos ^{f,g}

^aNeuromove Research Group, Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio (UCAM), Murcia, Spain; ^bFaculty of Health Science, European University of Canarias, La Orotava, Spain; ^cCentre for Sports Studies, Rey Juan Carlos University, Alcorcón, Spain; ^dThe Research Centre, Faculty of Sport and Physical Education, University of Belgrade, Belgrade, Serbia; ^eFaculty of Physical Education and Sport, Charles University, Prague, Czech Republic; ^fDepartment of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Granada, Granada, Spain; ^gDepartment of Sports Sciences and Physical Conditioning, Faculty of Education, Catholic University of the Most Holy Concepción, Concepción, Chile

ABSTRACT

This study aimed to compare the effect of three interset rest intervals (1, 3, and 5 minutes) on (I) mean velocity during a resistance training session conducted in a Smith machine with the squat and bench press exercises, and (II) the pre- and post-exercise force-velocity relationship. Fifteen male university students completed three sessions (i.e., Rest 1', Rest 3', and Rest 5') consisting of three sets of five repetitions against the 10RM load during the squat and bench press exercises. The force-velocity relationship (maximal values of force [F_0], velocity [v_0], and power [P_{max}]) was evaluated at the beginning and at the end of each session with the counter-movement jump and bench press throw exercises. During training, mean velocity was slower in sets 2 and 3 of the Rest 1' protocol compared to Rest 3' and Rest 5', but no significant differences were present between Rest 3' and Rest 5'. After training, there was a significant decrease in F_0 ($p = 0.017$) and P_{max} ($p = 0.010$), but not in v_0 ($p = 0.259$). These results support the Rest 3' as the most time-efficient protocol, among those analysed, for the maintenance of high mean velocities during training sessions not leading to failure.

ARTICLE HISTORY

Received 3 January 2020
 Accepted 3 May 2020

KEYWORDS

Force-velocity relationship;
 linear position transducer;
 strength training;
 velocity-based training

CONTACT Jorge M. González-Hernández  jorgemiguel.gonzalez@universidadeuropea.es

© 2020 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

9.1. INTRODUCTION

Resistance training (RT) is commonly used to improve strength, power, hypertrophy, and athletic performance (Adams et al., 2002; Tan, 1999). The manipulation of RT variables (e.g., type of exercise, load, number of sets and repetitions, movement velocity, interset rest periods, etc.) underpins the acute training stimulus and, consequently, the physiological adaptations to training (Spiering et al., 2008). When designing RT programs, these variables should not be considered in isolation because the training stimulus depends on their combined effect (Coffey & Hawley, 2007). For example, velocity output is affected by the load magnitude (slower velocities at greater loads) and the number of repetitions performed (slower velocities during the last repetitions of a training set) (García Ramos, Torrejón, et al., 2018; Morán Navarro et al., 2019). However, a question that remains to be addressed is the influence of the interset rest intervals on mean velocity. This is an important question because maintaining fast velocities during RT has been associated with larger improvements in sport actions such as sprints and jump height (González Badillo et al., 2014; Pareja Blanco et al., 2016).

Previous studies have shown that the acute and chronic effects of RT are influenced by the interset rest intervals (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Häkkinen, 2005; Kraemer, Noble, Clark, & Culver, 1987; Senna et al., 2009). The American College of Sports Medicine recommend short interset rest intervals (e.g., 30-90 seconds) during hypertrophy-oriented RT sessions, whereas longer interset rest intervals (e.g., 3-5 minutes) are recommended during strength-oriented and power-oriented RT sessions (Adams et al., 2002). However, recent evidence suggests that longer rest periods could also be recommended during hypertrophy based training because the ability to lift heavy loads could be reduced when short rest intervals are implemented (Schoenfeld et al., 2016). The maximum number of repetitions that can be completed is one of the variables most used to quantify the effect of interset rest intervals on mechanical performance (Rahimi, 2005; Senna et al., 2009). Rahimi (2005) showed that 5 minutes of interset rest allowed a higher volume than interset rest intervals of 1 and 2 minutes during a RT session consisting of 4 sets at the 85% of the one-repetition maximum (1RM) with the squat (SQ) exercise. Senna et al. (2009) also found that the number of repetitions completed during a RT session

with the leg press, leg extension, leg curl, bench press (BP), pec-deck and triceps pulley exercises was higher using 5 minutes compared to 2 minutes of interset rest. These results could be expected because it is known that longer rest intervals increase the recovery of bioenergetic factors such as adenosine triphosphate (ATP) and phosphocreatine (PCr) (Wells et al., 2009). However, the effect of interset rest intervals on mechanical variables when RT sets are not performed to muscular failure has received less scientific attention. This issue is worth investigating since previous studies have revealed greater increments in athletic performance when RT sets are not performed to failure (Davies, Orr, Halaki, & Hackett, 2015; Folland et al., 2002; Nóbrega & Libardi, 2016; Pareja Blanco et al., 2016).

Another important factor that should be considered is the residual fatigue induced by RT sessions. The mechanical fatigue induced by RT has been frequently assessed as the decrement in performance (e.g., jump height, movement velocity, or isometric force) against a single loading condition (Dos'Santos et al., 2017; Pérez Castilla, García Ramos, et al., 2018). However, a drawback of this procedure is that it does not allow to discern if a deterioration in performance is caused by a decrease in the maximal capacities of the muscles to produce force, velocity, or both (García Ramos et al., 2018; Jaric, 2016). The force-velocity (F-v) relationship should be determined to selectively assess the changes in the maximal capacities of the muscles to produce force (F_0), velocity (v_0), and power (P_{max}) (García Ramos & Jaric, 2019). It has been recently shown that the F-v relationship is a valid approach to assess the changes in F_0 , v_0 and P_{max} capacities after RT sets conducted with the BP exercise against different loads (60%1RM and 80%1RM) and using different training strategies (e.g., leading or not to muscular failure) (García Ramos et al., 2018). It is noteworthy that, due to the high linearity of the F-v relationship, the testing procedure of the F-v relationship can be simplified performing trials against only two different loads (i.e., two-point method) (García Ramos & Jaric, 2018). Therefore, an important issue to explore through the F-v relationship modelling could be the effect of RT sessions differing in the interset rest interval on the magnitude of F_0 , v_0 and P_{max} .

The aims of the present study were (I) to compare the effect of three different interset rest intervals (1, 3, and 5 minutes) on mean velocity during a RT session

conducted with the SQ and BP exercises performed in a Smith Machine, and (II) to explore the fatigue induced by RT sessions differing only in the interset rest duration on the F-v relationship of lower- and upper-body muscles. We hypothesised that (I) the slowest and the fastest mean velocities would be observed for the interset rest intervals of 1 and 5 minutes, respectively, and (II) all RT sessions, regardless of the interset rest interval, would have a negative impact on the F-v relationship of lower- and upper-body muscles (i.e., lower values of F_0 , v_0 , and P_{max}), but the largest negative effects would occur as a result of shorter interset rest intervals.

9.2. METHODS

9.2.1. Participants

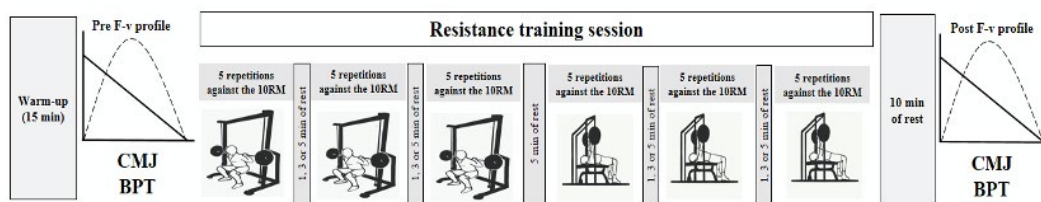
Fifteen male sport science students (mean \pm standard deviation [SD]; age = 20.3 ± 3.3 years, body mass = 72.1 ± 8.3 kg, height = 1.73 ± 0.04 m, SQ 10RM = 63.2 ± 11.7 kg, and BP 10RM = 47.3 ± 16.5 kg) participated in this study. Participants reported to be enrolled in RT programs that included the SQ and BP exercises for a minimum of 1 year and all them demonstrated a proper execution technique during both exercises. All participants were informed about the study procedures and signed a written informed consent before the initiation of the study. The study protocol adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the Institutional Review Board (935/CEIH/2019)

9.2.2. Experimental Design

A randomised crossover design was used to explore the effect of different interset rest intervals during a RT session on barbell velocity and the F-v relationship (Figure 14). Participants came to the laboratory on six occasions, twice a week, separated by at least 48 hours, over three consecutive weeks. Sessions 1-2 were used to ensure that all the participants could perform the SQ, countermovement jump (CMJ), BP and BP throw (BPT) exercises with proper technique against a variety of external loads. Session 3 was used to determine the 10RM load during the SQ and BP exercises, as well as the external load associated with a jump height of 12 cm during the CMJ exercise. The 10RM load determined in session 3 was applied during

the remaining experimental sessions (details of the main experimental sessions are presented below). Following previous studies, the external load associated with a jump height of 12 cm was used to determine the F-v relationship during the CMJ exercise in the three main experimental sessions (Garcia Ramos et al., 2018).

Figure 14. Overview of the experimental sessions. The order of the squat and bench press exercises performed during training and the interset rest protocols (1, 3 or 5 minutes) was counterbalanced between participants. CMJ, countermovement jump; BPT, bench press throw; RM, repetition maximum; F-v, force-velocity.



The three main experimental sessions (sessions 4-6) consisted of three sets of five repetitions against the 10RM load during the SQ and BP exercises. The only difference between the three experimental sessions was the interset rest duration (1 minute [Rest 1'], 3 minutes [Rest 3'] and 5 minutes [Rest 5']). The order of the SQ and BP exercises was counterbalanced between participants, but the same order was followed for individual participants in the three experimental sessions. The order of the interset rest protocols was randomised. The F-v relationship during the CMJ and BPT exercises was determined on two occasions during each session: 5 min after the warm-up (Pre) and 10 min after the last set of the training session (Post). All sessions were performed at the same time of the day for each participant.

9.2.2.1. Experimental sessions (sessions 4-6)

1. Warm-up. At the beginning of each RT session participants performed 5 minutes of jogging, dynamic stretching, 10 unloaded SQ, 5 SQ loaded by 50% of the 10RM load, 2 SQ against the 10RM load, 10 push-ups, 5 BP loaded by 50% of the

10RM load, and 2 BP against the 10RM load.

2. Force-velocity relationship modelling. Following the warm-up procedure, the F-v relationship was determined during the CMJ and BPT exercises through the two-point method (Garcia Ramos & Jaric, 2018). Two unloaded CMJs (light load) and two CMJs with the external load associated with a jump height of ≈ 12 cm (heavy load: 51.8 ± 13.6 kg) were performed separated by 1 minute. Thereafter, two trials of the BPT against the unloaded Smith machine barbell (light load: 20 kg for all participants) and two trials against the 10RM load (heavy load: 47.3 ± 16.5 kg) were performed separated by 1 minute. The trial with the highest jump height (CMJ) and fastest mean propulsive velocity (BPT) of each load was used for modelling the F-v relationship. It should be noted that the F-v relationship was also determined 10 minutes after completing the RT session in order to assess the residual fatigue of the RT sessions on F_0 , v_0 , and P_{max} .

The mean propulsive values of force and velocity were used to determine the F-v relationship during the CMJ exercise through the simple method proposed by Samozino and colleagues (Jiménez Reyes et al., 2017; Samozino, Morin, Hintzy, & Belli, 2008). Jump height was estimated from flight time using a validated mobile application (MyJump2) that recorded the video-image at 240 fps through an iPhone 8 plus (Balsalobre Fernandez et al., 2015). The mean propulsive values of force and velocity used to determine the F-v relationship during the BPT exercise were collected with a linear velocity transducer (T-Force System; Ergotech, Murcia, Spain) (Courel Ibáñez, J., Martínez Cava, A., Morán Navarro, R., Escribano Peñas, P., Chavarren Cabrero, J., González Badillo, & Pallarés, 2019; García Ramos et al., 2018). The loaded CMJ and BPT were performed in a Smith machine (Multipower FF683; Ffittech, Santo Estevao, Portugal). The mean propulsive values of force and velocity obtained under two loading conditions were used for the assessment of the F-v relationship through a linear model: $F(V) = F_0 - aV$, in which F_0 represents the force intercept and a is the slope of the F-v relationship. The maximum velocity ($v_0 = F_0/a$) and maximum power ($P_{max} = F_0 \cdot v_0/4$) were also calculated. An acceptable reliability of the two-point method for determining the F-v relationship during the CMJ and BPT exercises has been reported elsewhere (Garcia Ramos et al., 2018; Pérez Castilla, Jaric, et al., 2018).

3. Resistance training session. Each RT session consisted of three sets of five repetitions with the 10RM load during the full SQ and touch-and-go BP exercises. The only difference between the three experimental sessions was the duration of the interset rest interval: 1 minute (Rest 1' protocol), 3 minutes (Rest 3' protocol) and 5 minutes (Rest 5' protocol). The order of the exercises (SQ and BPT) and rest protocols (Rest 1', Rest 3' and Rest 5') was randomised. Regardless of the rest protocol, 5 minutes of rest were implemented between the SQ and BP exercises. Participants were encouraged to perform the concentric phase of all repetitions as fast as possible and the mean velocity was collected with a linear velocity transducer.

9.2.3. Statistical Analysis

Descriptive data are presented as means and SD. The normal distribution of the data (Shapiro-Wilk test) and the homogeneity of variances (Levene's test) were confirmed ($p > 0.05$). A three-way repeated measures ANOVA (exercise [SQ and BP], set [1, 2 and 3], and rest protocol [Rest 1', Rest 3' and Rest 5']) with Bonferroni post hoc corrections was conducted on the mean velocity of each set. A one-way ANOVA with Bonferroni post hoc corrections were also used to compare the mean velocity of each individual repetition between the rest protocols separately for the SQ and BP exercises. Finally, a three-way repeated measures ANOVA (exercise [SQ and BP], time [Pre and Post], and rest protocol [Rest 1', Rest 3' and Rest 5']) with Bonferroni post hoc corrections was applied on each F-v relationship parameter (F_0 , v_0 , and P_{max}). The intraclass correlation coefficient (ICC, model 3.1) calculated from the three Pre-session values revealed a high reliability for F_0 (ICC = 0.91 for CMJ and 0.98 for BPT) v_0 (ICC = 0.80 for CMJ and 0.81 for BPT) and P_{max} (ICC = 0.80 for CMJ and 0.96 for BPT). All statistical analyses were performed using SPSS software version 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) and statistical significance was set at an alpha level of 0.05.

9.3. RESULTS

The three-way ANOVA conducted on mean velocity showed significant main effects for the exercise, number of sets (set 1 > set 3 [5.7% higher velocity]; set 2 > set 3 [3.2% higher velocity]), and rest protocol (Rest 3' > Rest 1' [11.7% higher

velocity]; Rest 5' > Rest 1' [7.4% higher velocity] (Table 10, Figure 15). No significant differences in mean velocity were observed between the sets 1 and 2 ($p = 0.052$, 2.4% higher velocity) nor between the Rest 3' and Rest 5' protocols ($p = 0.088$, 3.9% higher velocity). The exercise \times set interaction ($p = 0.012$) was caused by the higher velocity loss observed in the BP compared to the SQ (set 3 vs. set 1: 11.8% and 1.6% of velocity loss, respectively). The set \times rest protocol interaction ($p < 0.001$) was caused by the lower velocities at sets 2 and 3 for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols. The velocity achieved against individual repetitions was lower for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' (4 repetitions in the SQ and 9 repetitions in the BP) and Rest 5' protocols (7 repetitions in the BP), while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5' protocols (Figure 15).

Table 10. Three-way repeated measures ANOVA used to compare movement velocity between the exercises, sets, and rest protocols.

Exercise	Set	Rest 1' (m·s ⁻¹)	Rest 3' (m·s ⁻¹)	Rest 5' (m·s ⁻¹)	Main effects	Interactions
Squat	1	0.65 ± 0.07	0.66 ± 0.07	0.64 ± 0.06	E: F = 50.2, $p < 0.001$ S: F = 12.3, $p < 0.001$ R: F = 19.9, $p < 0.001$	E×S: F = 5.3, $p =$ 0.012 E×R: F = 2.4, $p =$ 0.110 S×R: F = 9.5, $p <$ 0.001 E×S×R: F = 3.9, $p = 0.008$
	2	0.62 ± 0.07	0.67 ± 0.08	0.64 ± 0.09		
	3	0.61 ± 0.09	0.66 ± 0.08	0.64 ± 0.09		
Bench press	1	0.45 ± 0.08	0.48 ± 0.06	0.46 ± 0.06	E: F = 50.2, $p < 0.001$ S: F = 12.3, $p < 0.001$ R: F = 19.9, $p < 0.001$	E×S: F = 5.3, $p =$ 0.012 E×R: F = 2.4, $p =$ 0.110 S×R: F = 9.5, $p <$ 0.001 E×S×R: F = 3.9, $p = 0.008$
	2	0.40 ± 0.10	0.48 ± 0.07	0.46 ± 0.06		
	3	0.34 ± 0.12	0.47 ± 0.06	0.45 ± 0.07		

Rest 1', 1 minute of interset rest; Rest 3', 3 minutes of interset rest; Rest 5', 5 minutes of interset rest. E, exercise; S, set; R, interset rest.

Figure 15. Comparison of mean velocity between the different interset rest protocols and number of sets for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'. NS, no significant differences between sets.

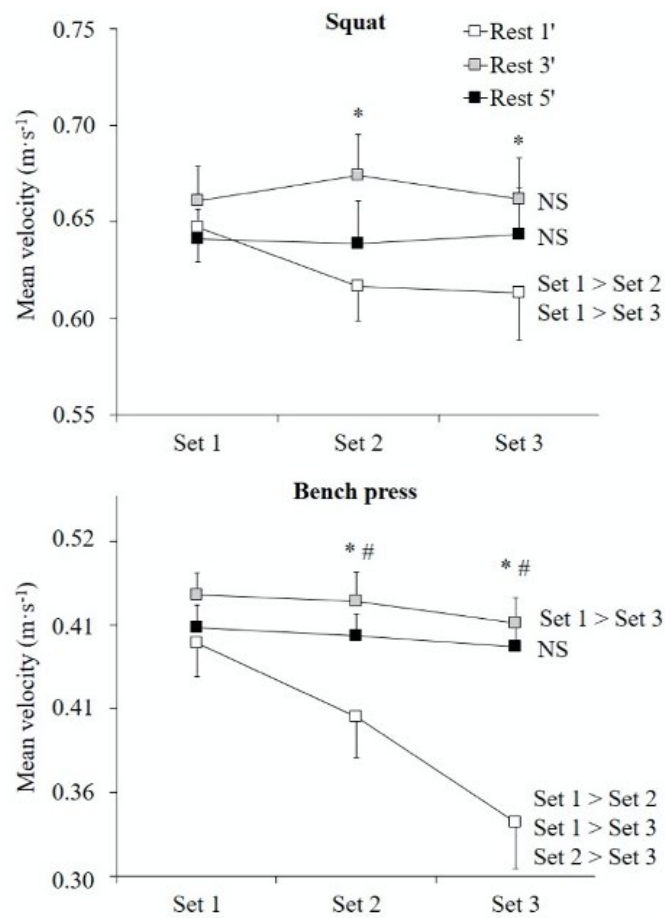
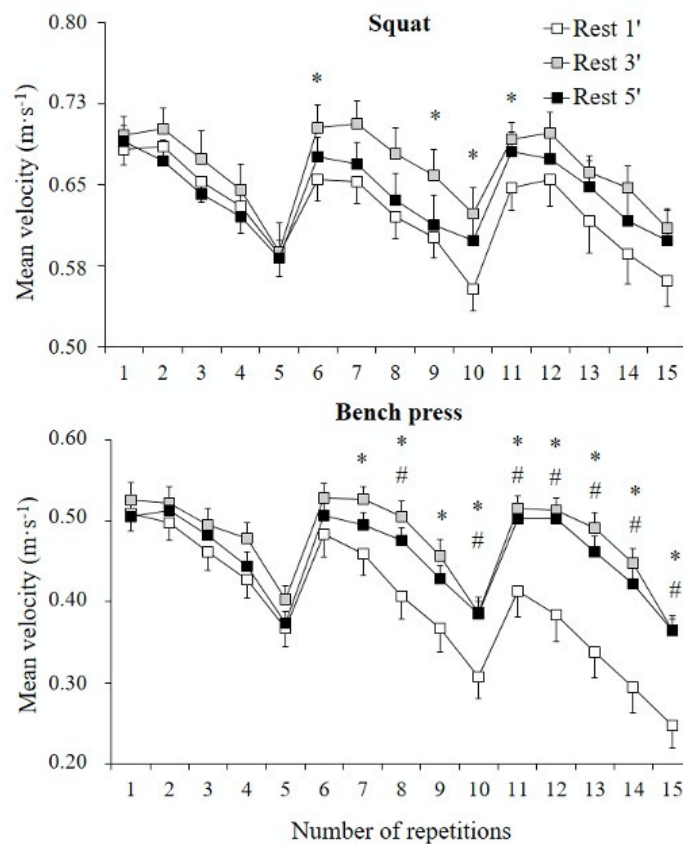


Figure 16. Comparison of mean velocity at each repetition between the interset rest protocols of minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 minutes (Rest 5'; grey squares) for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. Error bars depict the standard error. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'.



The results of three-way ANOVA conducted on each F-v relationship parameter are depicted in Table 2. A significant main effect of time was observed for F0 and Pmax due to lower values at Post (-2.5% and -5.4%, respectively). The main effect of the rest protocol was significant for v0 and Pmax due to higher values for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' (5.1%) and Rest 5' protocols (6.7%). The exercise × time interaction was only significant for Pmax due to a higher impairment

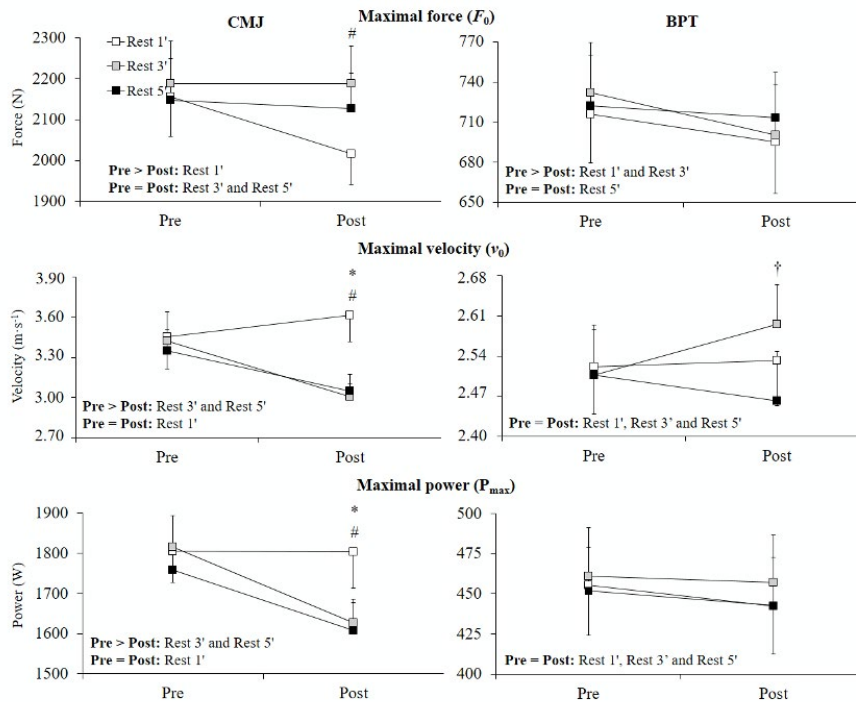
at Post in the CMJ compared to the BPT. The exercise \times rest protocol interaction was significant for v_0 and P_{\max} due to higher values for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols during the CMJ, while no significant differences were observed during the BPT. The time \times rest protocol interaction was significant for all parameters (F_0 : higher decrement for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols; v_0 : higher decrement for the Rest 5' protocol compared to the Rest 1' and Rest 3' protocols; P_{\max} : lower decrement for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols). Pairwise comparisons between the time points and rest protocols are presented in Figure 17.

Table 11. Three-way repeated measures ANOVA used to compare the force-velocity relationship parameters between the exercises, point of measure, and rest protocols.

Parameter	Exercise	Time	Rest 1'	Rest 3'	Rest 5'	Main effects	Interactions
F_0 (N)	CMJ	Pre	2155 \pm 373	2188 \pm 405	2148 \pm 396	E: F = 535.1, $p <$ 0.001	E\timesT: F = 1.6, $p = 0.233$ E\timesR: F = 2.3, $p = 0.118$
		Post	2017 \pm 293	2187 \pm 359	2127 \pm 333		
	BPT	Pre	716 \pm 141	732 \pm 144	722 \pm 147	T: F = 7.3, $p =$ 0.017	T\timesR: F = 6.5, $p = 0.005$
		Post	695 \pm 149	700 \pm 147	713 \pm 131		
	<hr/>						
	v_0 ($m \cdot s^{-1}$)	CMJ	Pre	3.46 \pm 0.93	3.42 \pm 0.85	3.35 \pm 0.61	E: F = 18.4, $p =$ 0.001
Post			3.61 \pm 0.77	3.01 \pm 0.37	3.05 \pm 0.49		
BPT		Pre	2.52 \pm 0.32	2.51 \pm 0.34	2.51 \pm 0.31	T: F = 1.4, $p =$ 0.259	T\timesR: F = 5.7, $p = 0.008$
		Post	2.53 \pm 0.30	2.60 \pm 0.27	2.46 \pm 0.34		
<hr/>							
P_{\max} (W)		CMJ	Pre	1805 \pm 303	1816 \pm 306	1759 \pm 246	E: F = 548.3, $p <$ 0.001
	Post		1805 \pm 353	1627 \pm 227	1609 \pm 263		
	BPT	Pre	455 \pm 120	461 \pm 117	452 \pm 103	T: F = 8.8, $p =$ 0.010	T\timesR: F = 3.4, $p = 0.048$
		Post	442 \pm 117	457 \pm 114	443 \pm 115		
	<hr/>						

F_0 , maximal force; v_0 , maximal velocity; P_{\max} , maximal power; Rest 1', 1 minute of intersert rest; Rest 3', 3 minutes of intersert rest; Rest 5', 5 minutes of intersert rest. E, exercise; T, Time; R, intersert rest.

Figure 17. Comparison of the maximal capacities of the muscles to produce force (upper-panel), velocity (middle panel) and power (lower panel) before (Pre) and after (Post) the training session for the interset rest protocols of 1 minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 minutes (Rest 5'; grey squares) during the countermovement jump (CMJ; left panels) and bench press throw (BPT; right panels) exercises. Error bars depict the standard error. *, significant differences between Rest 1' and Rest 3'; #, significant differences between Rest 1' and Rest 5'; †, significant differences between Rest 3' and Rest 5'.



9.4. DISCUSSION AND IMPLICATIONS

This study was designed to compare mean velocity and the changes in the F-v relationship parameters between RT sessions differing only in the duration of the interset rest intervals. The RT session comprised three sets of a lower-body

(SQ) and three sets of an upper-body (BP) exercise. The main findings of this study revealed lower velocities for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols, while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5' protocols. However, the decrement in Pmax was higher for the Rest 3' and Rest 5' protocols compared to the Rest 1' protocol. Therefore, although the Rest 1' protocol does compromise the maintenance of high mean velocities during the successive sets of a RT session, the residual fatigue induced by the RT session (assessed by the decrement in the magnitude of the F-v relationship parameters) does not seem to be increased when short interset rest intervals are used.

The adaptation of the neuromuscular system to RT is mediated by the stimuli received (Coffey & Hawley, 2007; Pareja Blanco et al., 2016). Lifting at maximal velocity is effective to develop muscular power and the rate of force development (RFD), whereas intentionally lifting at slow velocities could be effective to induce hypertrophy adaptations (Izquierdo, Ibañez, González Badillo, et al. 2006; Pareja Blanco et al., 2016), although Schoenfeld et al. (2016) has shown that high velocities can also induce hypertrophy gains. Therefore, since maximal power and RFD are of paramount importance for the performance of many sport-specific tasks (e.g., jumping, sprinting, change of direction, throwing, etc.) (González Badillo et al., 2014; Pareja Blanco et al., 2014), athletes are frequently encouraged to maximise velocity performance during RT (Weakley et al., 2018). Despite the proven benefits of training at high velocities, little research has been conducted to examine the effect of manipulating different RT variables on the capacity to develop high velocities during RT. To our knowledge, this is the first study that has examined the effect of different interset rest intervals (1, 3 and 5 minutes) on the capacity to maintain high velocities during RT.

Our first hypothesis was only partially supported. As hypothesised, the Rest 1' protocol provided slower velocities during the sets 2 and 3 in comparison to the Rest 3' and Rest 5' protocols for both the SQ and BP exercises. However, although we also hypothesised faster velocities for the Rest 5' protocol compared to the Rest 3' protocol, no significant differences in mean velocity were observed between these protocols. The lower velocity performance for the Rest 1' protocol was expected because longer rest intervals increase the recovery of ATP and PCr,

while it could be speculated that the levels of ATP and PCr could be recovered after 3 minutes specially when the training sets are not performed to failure (Wells et al., 2009). Therefore, although the Rest 3' and Rest 5' protocols allowed a comparable velocity performance, the Rest 3' protocol presents the main advantage of the RT session being shorter. Similar results were obtained by Abdessemed et al. (1999) who reported higher blood lactate concentration and lower power production during a RT session that comprised 10 sets of 6 repetitions of the BP at 70%1RM using interset rest intervals of 1 minute compared to interset rest intervals of 3 and 5 minutes. The load magnitude ($\approx 75\%1RM$) and the training strategy (i.e., sets not performed to muscular failure) could have influenced these results, being plausible that the use of heavier loads or leaving less repetitions in reserve (i.e., approaching to muscular failure) would require longer interset rest for maintaining velocity performance during RT sessions. However, based on the results discussed above, it seems that 3 minutes of interset rest is optimal for the maintenance of high velocities during RT sessions conducted with the SQ and BP exercises against moderate loads ($\approx 75\%1RM$ or 10RM) when approximately half of the maximum number of repetitions per set are performed.

To our knowledge, this has also been the first study that has used the F-v relationship modelling to quantify the fatigue induced by RT sessions on F_0 , v_0 , and P_{max} . We hypothesised that a significant decrement in F_0 , v_0 , and P_{max} would be observed after all RT sessions, being the decrement accentuated using shorter interset rest intervals. This hypothesis was only partially confirmed since after the RT sessions a significant decrease was observed for F_0 and P_{max} , but not in V_0 . However, the lack of significant change for v_0 is in line with the study of García Ramos et al. (2018) who reported a significant decrement in F_0 but not in v_0 after RT sets not performed to failure during the BP exercise. Therefore, reducing the level of effort by performing approximately half of the maximum number of repetitions per sets seems an appropriate strategy to preserve v_0 capacity. Although the decrement in mean velocity during training was higher for the Rest 1' protocol, the magnitude of the deterioration of the F-v relationship parameters after training did not differ between the different interset rest protocols. The lack of differences in the residual fatigue induced by the RT sessions could be explained because after 10 minutes of rest the recovery of bioenergetic factors such as ATP and PCr should be

similar for the three interset rest protocols (Wells et al., 2009; Willardson & Burkett, 2005).

One limitation of the study is that only mechanical variables were collected. Therefore, the response of other variables that are known to influence the acute training stimulus and the subsequent neuromuscular and physiological adaptations (e.g., metabolic biomarkers [e.g., lactate], muscle damage markers [e.g., creatine kinase] or hormones [e.g., testosterone and cortisol]) remain unexplored. Future studies should also explore the effect of interset rest duration on mechanical performance using other exercises (e.g., leg press or pull-ups), loads (e.g., 20RM and 5RM), training strategies (i.e., proximity to failure), and participant populations (e.g., women or highly trained athletes). For example, although the Rest 3' protocol provided satisfactory results in the present study, it is plausible that longer interset rest periods are needed to maintain mechanical performance when lifting heavier loads or when the sets are finished closer to failure. Finally, it is important to note that only 3 sets were performed for each exercise and, therefore, it remains to be elucidated whether the Rest 5' protocol could provide better results than the Rest 3' protocol with increasing number of sets. However, the results of the present study provide valuable practical information because it is frequent to prescribe 3 sets per exercise during RT programs.

9.5. CONCLUSION

Finally, we can conclude that mean velocity during training was significantly lower for Rest 1' compared to Rest 3' and Rest 5', while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5'. The residual fatigue of the RT sessions on the magnitude of the F-V relationship parameters was not meaningfully affected by the interset rest intervals. Therefore, Rest 3' and Rest 5' could be recommended over Rest 1' for the maintenance of acute mean velocities during training, with Rest 3' possibly desirable over Rest 5' because it shortens the RT session. The Rest 3' protocol should be recommended for the maintenance of high velocities during RT sessions conducted with the SQ and BP exercises performed against the 10RM load when only half of the maximum number of repetitions per set are performed. However, the level of fatigue induced by the RT session does not seem to be affected

by the interser rest interval.

Disclosure statement: No financial interest or benefit has arisen from the direct applications of our research.



Estudio IV

X/ ESTUDIO IV

*Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol**Journal of Strength and Conditional Research Under Review****Authors:**

Jorge M. González-Hernández,^{1,2*} Pedro Jiménez-Reyes,³ José J Cerón,⁴ Asta Tvariionaviciute,⁴ Francisco J. Llorente-Canterano,⁵ Luis M. Martínez-Aranda,¹ Amador García-Ramos.⁶

Affiliations:

¹Neuromove Research Group, Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio (UCAM), Murcia, Spain

²Faculty of Health Science, Universidad Europea de Canarias, Tenerife, Spain

³Centre for Sport Studies, King Juan Carlos University, Madrid, Spain

⁴Interdisciplinary Laboratory of Clinical Analysis, University of Murcia, Spain

⁵Department of Physical Education and Sport, Faculty of Education. University of Sevilla, Spain

⁶Department of Sport Sciences and Physical Conditioning, Faculty of Education, CIEDE, Catholic University of Most Holy Concepción, Concepción, Chile

Corresponding author:

Jorge Miguel González Hernández, MSc, NSCA-CSCS,
Universidad Europea de Canarias,
Inocencio García 1, 38300
La Orotava,
Santa Cruz de Tenerife,
Canary Island,
Spain
ORCID 0000-0003-3835-7104

10.1. ABSTRACT

This study aimed (I) to examine the acute and delayed responses of three muscle damage biomarkers: creatine kinase (CK), aspartate aminotransferase (AST) and lactate dehydrogenase (LDH) to an accentuated eccentric training protocol in serum, and (II) to explore the changes of these biomarkers in saliva and compare them with serum. Sixteen resistance-trained university students (10 men [age = 26.6 ± 4.8 years, full squat one-repetition maximum [1RM] = 103.4 ± 14.4 kg] and 6 women [age = 22.7 ± 1.4 years, full squat estimated 1RM = 68.3 ± 10.5 kg]) completed an accentuated eccentric strength training protocol with the full squat exercise consisting of 8 sets of 10 repetitions against the 120% estimated 1RM load with 5 minutes of intersets rest. The activity of muscle damage biomarkers (CK, AST and LDH) were measured in serum and saliva before training (Pre), 24 hours after training (Post24), and 96 hours after training (Post96). In serum lower values of the three muscle damage markers were observed at Pre compared to Post24 and Post96, while no significant differences were observed between Post24 and Post96 for any analyte. In saliva there was a significant increase in men at Post96 compared with Pre in CK. The correlations between the measurements in serum and saliva ranged from trivial to small ($r = -0.034$ to 0.212). These results suggest that the measurement of muscle damage markers in serum and saliva do not provide the same information in the conditions of our study.

Keywords: aspartate aminotransferase, creatine kinase, lactate dehydrogenase, resistance training.

10.2. INTRODUCTION

Eccentric strength training is commonly used in sport environments to enhance physical performance (Askling, Karlsson, & Thorstensson, 2003; Cook, Beaven, & Kilduff, 2013; Sheppard et al., 2008), as well as during rehabilitation programs to speed up injury recovery processes (Kingma, de Knikker, Wittink, & Takken, 2007). An eccentric action involves the active lengthening of the muscles (Schoenfeld et al., 2017). Eccentric actions are present in most of the sport-specific skills (e.g., jumping, sprinting, throwing, etc.) and also during basic resistance training exercises (e.g.,

squat, bench press, etc.). It is known that the eccentric strength potential is higher than the concentric one (maximal force output is \approx 20-50% higher during eccentric actions) (Enoka, 1996). Therefore, during conventional resistance training the intensity of the eccentric portion of the movement is never maximized, since the magnitude of the load is limited by the maximal concentric force. To overcome this limitation, an advance training method known as “accentuated eccentric training” has been frequently included within athletes’ resistance training routines (Douglas et al., 2018; Sheppard et al., 2008). Briefly, accentuated eccentric training consists of exercising against loads higher than the one-repetition maximum (1RM) (Douglas et al., 2018). The higher force that can be produced during supramaximal eccentric actions together with the high muscle microtrauma induced by eccentric actions are believed to stimulate the muscle adaptation process (Wagle et al., 2017). In this regard, there is strong evidence supporting the superiority of accentuated eccentric training compared to concentric-only training to induce gains in maximal strength (Walker et al., 2016). However, practitioners should also be concerned about the high muscle damage induced by accentuated eccentric training because it may cause perturbations in post exercise metabolic rate (Dolezal et al., 2000) and lengthen the recovery process (Brancaccio et al., 2010).

Knowing the muscle damage induced by resistance training is valuable to avoid overtraining and reduce the injury risk (Hartmann & Mester, 2000). The two most accurate methods for assessing muscle damage in humans are muscle biopsies and magnetic resonance imaging (Gibala et al., 1995). An alternative method is to measure the concentration of different muscle damage markers in serum (e.g., creatine kinase [CK], aspartate aminotransferase [AST] and lactate dehydrogenase [LDH]) (Paola Brancaccio et al., 2010). Serum measurements are based on the fact that after a physical effort there is a leakage of proteins and enzymes into the extracellular fluid due to the disturbance of the cellular muscle membrane (Brancaccio et al., 2010). Many studies have evaluated muscle proteins and enzymes in serum to estimate the muscle damage induced by different resistance training protocols (Brancaccio et al., 2007; Chen et al., 2019; Pareja Blanco et al., 2016). Depending on the training type, the peak values of muscle damage markers in serum have been observed between 24 and 96 hours post-exercise (Koch et al., 2014). Jamurtas et al. (2000) compared the CK response in serum at 24, 48 and 72 hours post plyometric

and eccentric training, and they reported the highest levels of CK after eccentric training and the peak values 24 hours after training. However, Nosaka et al. (2002) reported higher CK values after 96 hours of eccentric training compared to 24 and 48 hours after training.

Even though the blood collection is considered an efficient and valid procedure for exploring the muscle damage response to physical exercise (Friden & Lieber, 2001), this method is somehow painful, invasive and time-consuming. Saliva has been described of potential use for the measurement of different analytes, including muscle damage markers in saliva samples (Barranco et al., 2017; Deminice et al., 2010). The main advantages to measure biochemical variables in saliva are a better tolerance to sampling by participants and that it can be collected simultaneously in multiple subjects under field conditions (Deminice et al., 2010). Several studies have already reported the hormonal response in saliva after different training protocols (Beaven et al., 2008; L. D. Hayes, Sculthorpe, & Baker, 2015), but only few studies have examined the muscle damage response in saliva (Barranco et al., 2017). In addition, there are no previous reports about the level of agreement between serum and saliva procedures when determining markers related to muscle damage after a controlled effort. Therefore, it would be of interest to explore whether the activity of muscle damage markers (e.g., CK, AST and LDH) in saliva is correlated to those measured in serum.

The purposes of this study were (I) to examine the acute (Post 24 hours; Post24) and delayed (Post 96 hours; Post96) responses of muscle damage biomarkers (CK, AST and LDH,) to an accentuated eccentric training protocol in serum, and (II) to explore the changes of these biomarkers in saliva and compare them with serum. We hypothesized that (I) the concentration of CK, AST and LDH would be significantly higher at Post24 and Post96 compared to Pre, and (II) these enzymes would show changes in serum and saliva after the training protocol.

10.3. METHOD

10.3.1. Experimental approach to the problem

A repeated-measures design was used to investigate the muscle damage response to an accentuated eccentric strength training protocol conducted with the full squat exercise. The training protocol consisted of 8 sets of 10 repetitions against the 120% estimated 1RM load. The duration of the eccentric phase was set at 3 seconds and 5 minutes of rest were implemented between successive sets. Subjects came to the laboratory on four occasions. The first session was used to familiarize the subjects with the saliva extraction process, determine the estimated 1RM load during the full squat exercise, and certify that all of subjects were able to perform the eccentric full squat protocol with a proper technique. The second one after 72 hours of rest to perform the eccentric strength training protocol. Serum and saliva samples were collected at the beginning of session 2 (Pre), 24 hours after training (session 3; Post24) and 96 hours after training (session 4; Post96). Extractions of serum and saliva were always conducted in the morning (0800-0930 hours) at rest and fasting.

10.3.2. Subjects

Sixteen resistance-trained sport sciences students (mean \pm standard deviation [SD]; men: $n= 10$, age= 26.6 ± 4.8 years, height= 1.75 ± 0.11 m, body mass= 76.9 ± 10.4 kg, and full squat estimated 1RM= 103.4 ± 14.4 kg; women: $n= 6$, age= 22.7 ± 1.4 years, height= 1.66 ± 0.06 m, body mass= 60.1 ± 12.2 kg, full squat estimated 1RM= 68.3 ± 10.5 kg) participated in this study. All participants had more than 2 years of resistance training experience and demonstrated to perform the full squat exercise with a proper technique during the familiarization session. Exclusion criteria were: 1) smoking; 2) suffering from or history of any chronic disease and no significant oral, dental or other symptoms of infection; and 3) taking any medication in the month prior to the exercise. All subjects were fully informed of any possible risk and discomfort associated with the experimental procedures and signed a written consent before the initiation of the study. The experimental protocol was approved by the local ethical committee of the Catholic University of San Antonio (Murcia)

in agreement with the Declaration of Helsinki.

10.3.3. Procedures

The study protocol consisted of four sessions. The full squat 1RM was estimated in the first session through the individual load-velocity relationship (Pérez Castilla et al., 2017). Subjects performed a 10 minutes standardized warm-up that included jogging, joint mobility exercises, two sets of eight unloaded squats, five progressive countermovement jumps, and one set of eight repetitions against 20 kg during the full squat exercise. Thereafter, an incremental loading test was performed using the full squat exercise following the procedure described by Pérez Castilla et al. (2017). The initial load was set at 20 kg for all subjects and was progressively incremented in 10 kg until the mean concentric velocity of the barbell was below 0.60 m·s⁻¹ (\approx 80%1RM). Two repetitions were performed with each load and 3 minutes of passive rest were implemented between successive sets. Subjects were instructed to perform all repetitions at maximum intended velocity. The velocity collected at the different loads was used to estimate the full squat 1RM through an individual linear regression model as the load associated with a mean velocity of 0.33 m·s⁻¹ (Pérez Castilla et al., 2017). The 1RM was estimated from the individual L-V relationship instead of performing an actual 1RM test to minimize the fatigue and discomfort associated with lifting the 1RM load during the full squat exercise. Note that although subjects had resistance training experience, some of them were not lifting loads close to their 1RM during their regular training. The mean velocity of the barbell was calculated from the displacement-time data recorded at 1,000 Hz by a linear position transducer (Chronojump, Barcelona, Spain). The squat exercise was always performed in a Smith machine (Technogym, Cesena, Italy).

The second session consisted of an accentuated eccentric training protocol consisting of 8 sets of 10 repetitions against the 120% estimated 1RM load with 5 minutes inter-set resting time. The full squat was chosen because it is one of the most used exercises to improve lower-limb muscular strength (Schoenfeld, 2010a). The duration of the eccentric phase was set to 3 seconds and subjects were helped to lift the load during the concentric phase. An experienced researcher was responsible to verbally encourage the subjects to perform all eccentric phases with a 3-second

length controlled by a metronome.

10.3.4. Serum and saliva samples

- Serum: Blood samples were extracted from the antecubital vein (12 ml) in plain tubes which were used to measure CK, AST and LDH. The analyses were performed by spectrophotometry using commercial kits (Beckman) on an automated biochemical analyzer (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea USA) (Barranco et al., 2017).

- Saliva: Subjects performed mouthwash before collecting each saliva sample. Saliva was collected using Salivettes devices. It consisted in a tube with straw through (passive droll) and the subjects were salivating for 1 minute. Salivettes were stored on ice until all measurements were finished. The Salivettes were then centrifuged at 3,500 rpm for 7 minutes, and the supernatant were removed from the tube and stored at -80 °C until they were analyzed. CK, AST and LDH were measured with commercial kits. All the assays were adapted to use in saliva samples and performed in an automated biochemistry analyzer (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea, USA) at 37°C (Barranco et al., 2017). The saliva analysis was carried out using absolute values and following the validation process according of Barranco et al. (2017)

10.3.5. Statistical analyses

Descriptive values of all dependent variables (i.e., CK, AST, and LDH) are presented as means, SD, and range. The normal distribution assumption was violated for all dependent variables (Shapiro-Wilk test: $p < 0.05$). Consequently, the Friedman test was used to explore the effect of an eccentric strength training protocol on muscle damage markers measured in serum and saliva at three time points (Pre, Post24, and Post96). The magnitude of the differences between the time points was calculated through the Cohen's d effect size (ES) and the following scale was used for interpretation: negligible (< 0.2), small (0.2–0.5), moderate (> 0.5 –0.8),

and large (≥ 0.8) (Cohen, 2013). Bland-Altman plots were constructed to explore the level of agreement between the three muscle damage markers measured in saliva (practical measure) and serum (criterion measure). Since we observed a proportional bias for the three markers ($r^2 > 0.1$) (Atkinson & Nevill, 1998), the data were log-transformed before calculating the Pearson's product-moment correlation coefficients (r) (Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009). The criteria to interpret the strength of the r coefficients was as follows: trivial (< 0.1), small (0.1-0.3), moderate (0.3-0.5), high (0.5-0.7), very high (0.7-0.9), or practically perfect (> 0.9). Statistical analyses were performed using the software package SPSS (IBM SPSS version 22.0, Chicago, IL, USA). Statistical significance was set at $p < 0.05$.

10.4. RESULTS

Descriptive data of the three analytes at the three time points are presented in Table 12. In serum, the ANOVA test revealed significant differences between the time points for the three muscle damage markers ($p \leq 0.001$). Post hoc analyses revealed significantly lower values at Pre compared to Post24 (CK: $p < 0.001$, ES= 1.46; AST: $p < 0.001$, ES= 1.11; LDH: $p = 0.010$, ES= 0.66) and Post96 (CK: $p < 0.001$, ES= 1.24; AST: $p < 0.001$, ES= 1.23; LDH: $p = 0.001$, ES= 1.22). No significant differences were observed between Post24 and Post96 for CK ($p = 1.00$, ES= 0.44), AST ($p = 1.00$, ES= 0.24), or LDH ($p = 1.00$, ES= 0.65) (Figure 18).

Table 12. Descriptive values of the three muscle damage markers measured in serum and saliva at three time points.

		CK (UI/L)			AST (UI/L)			LDH (UI/L)		
		Men (n = 9)	Wo men (n = 6)	Total (n = 15)	Me n (n = 9)	Wo men (n = 6)	Tot al (n = 15)	Me n (n = 9)	Wo men (n = 6)	Tot al (n = 15)
Pre	Mean	215	90	165	28	19	25	35	313	337
	SD	150	35	132	9	5	9	53	50	54
	Range	58– 558	66– 158	58– 558	19– 50	13– 28	13– 50	4– 41	248– 365	248– 418

Serum	Post 24	Mean	2142**	385*	1439***	80**	31*	60**	413*	353*	389*
		SD	1778	231	1618	65	11	55	115	78	104
		Range	179–4704	125–601	125–4704	–21	17–43	17–211	0–59	281–497	280–597
	Post 96	Mean	3287**	1671*	2641***	81**	66*	75**	486*	477	482**
		SD	4767	1804	3850	82	66	74	169	223	185
		Range	79–11829	106–4247	79–11829	–27	17–193	17–272	6–82	283–877	276–877
Saliva	Pre	Mean	52	30	43	25	17	22	454	576	503
		SD	42	14	35	14	11	13	378	490	414
		Range	8–128	13–49	8–128	8–46	7–33	7–46	0–13	86–1294	86–1380
	Post 24	Mean	28	33	30	17	22	19	379	661	492
		SD	20	31	24	11	16	13	219	811	532
		Range	7–60	10–93	7–93	6–34	8–46	6–46	–69	104–2267	97–2267
Post 96	Mean	81*	95	86	30	21	26	496	632	550	
	SD	76	132	98	28	18	24	311	702	486	
	Range	8–201	9–349	8–349	4–82	6–55	4–82	2–94	195–2019	–2019	

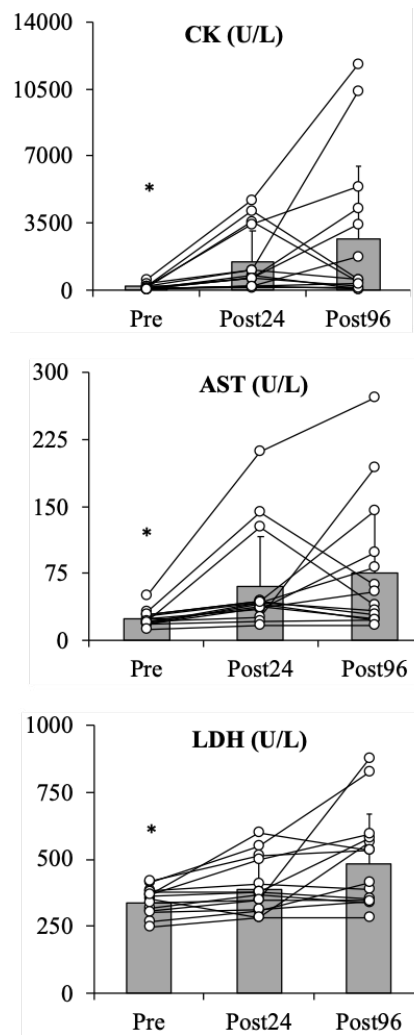
SD, standard deviation; CK, Creatine kinase; AST, Aspartate aminotransferase; LDH, Lactate dehydrogenase.

*** Significant difference ($p \leq 0.001$) Pre vs Post

** Significant difference ($p \leq 0.01$) Pre vs Post

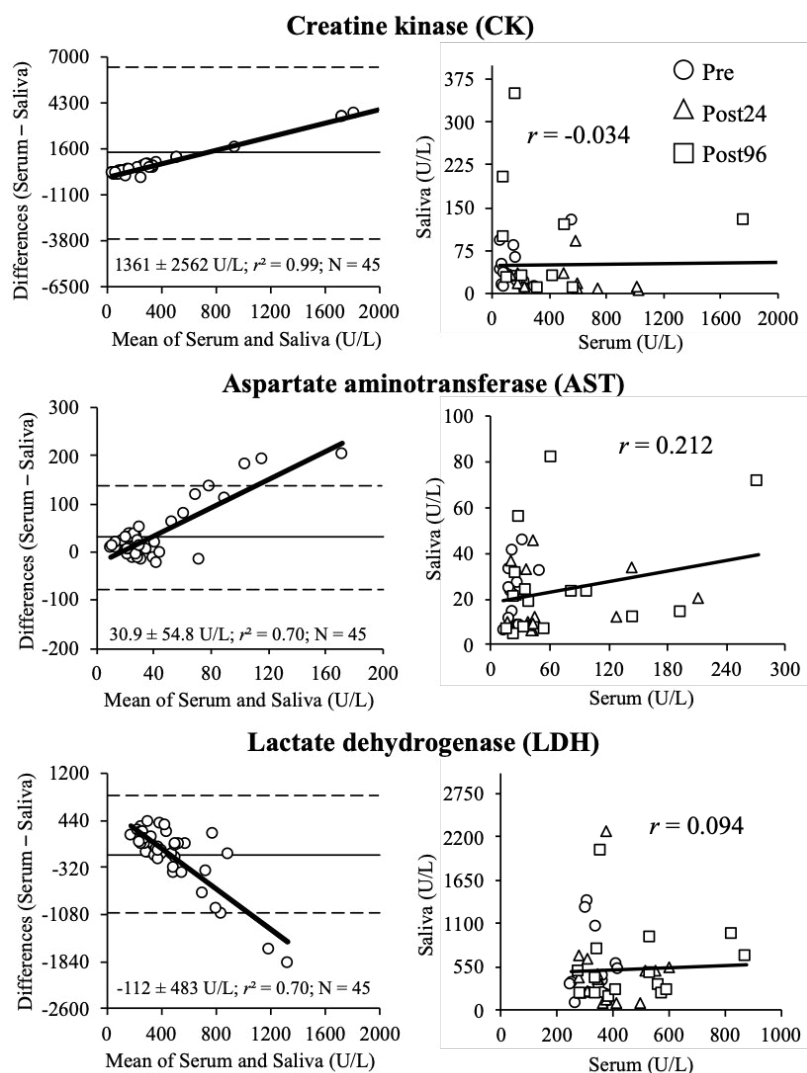
* Significant difference ($p \leq 0.05$) Pre vs Post

Figure 18. Comparison of Creatine kinase (CK) Aspartate aminotransferase (AST) and Lactate dehydrogenase (LDH) measured in serum between the three time points. The individual values (dots), averaged across the subjects values (bars) and standard deviations (error bars) are depicted. *, significantly lower than Post24 and Post96 ($p \leq 0.001$).



In saliva there was a significant increase at 96h after the exercise in males ($p < 0.05$, $ES = 0.82$). On the other hand, the values of CK and AST measured in saliva were significantly lower compared to serum (CK: $p = 0.001$, $ES = -1.03$; AST: $p < 0.001$, $ES = -0.84$), while no significant differences were observed for LDH between serum and saliva ($p = 0.126$; $ES = 0.37$). Bland-Altman plots revealed a low level of agreement between serum and saliva measurements (high random errors and heteroscedasticity of the errors) and the correlations ranged from trivial to small (Figure 19).

Figure 19. Bland-Altman plots (left hand panels) and association (right hand panels) of Creatine kinase (CK, upper panel), Aspartate aminotransferase (AST, middle panel) and Lactate dehydrogenase (LDH, lower panel) measured in serum and saliva. Each Bland-Altman plot depicts the averaged difference and 95% limits of agreement (dashed lines), along with the regression line (solid line). The Pearson's correlation coefficient (r) was calculated using the log-transformation since the assumption of homoscedasticity was violated.



10.5. DISCUSSION

This study was designed to explore the responses of three muscle damage markers (CK, AST and LDH) measured in serum and saliva to an accentuated eccentric training protocol conducted with the full squat exercise. The main findings of this study revealed (I) a significant increase of muscle damage markers at Post24 and Post96 compared to Pre values in serum, and (II) a low level of agreement between the same muscle damage markers measured in serum and saliva. These results highlight that the values of muscle damage markers measured in both samples are not closely related and, therefore, saliva measurements should not be used to infer the values of muscle damage markers in serum in situations of acute muscle damage similar to that we used in our study.

The eccentric phase is a common component in different sport skills, such as jumping, sprinting or change of direction among others. Hence, eccentric training is frequently implemented during the resistance training sessions of many athletes (Roig et al., 2009). Accentuated eccentric training is a type of eccentric training in which the applied load is higher than the 1RM (Walker et al., 2016). Several studies have reported benefits of accentuated eccentric training on hypertrophy (Brandenburg et al., 2002) and sport performance (Douglas et al., 2018; Sheppard et al., 2008; Wagle et al., 2017), being recommended to perform the eccentric phase for 3-5 seconds (Rathleff et al., 2013). The longer time under tension compared to traditional eccentric training has shown to produce greater muscle damage inducing a faster protein synthetic response and superior increase in anabolic signaling (Chen et al., 2019). Furthermore, eccentric actions produce the disruption of contractile, structural, and supportive elements due to specific force demands on fewer active fibers (Enoka, 1996). Therefore, it would be of interest to measure the effect of accentuated eccentric training on physiological variables (e.g., markers of muscle damage) to prescribe the training programs according to the stress induced to the athletes. In the present study we have not only examined the response of muscle damage markers to an accentuated eccentric training protocol, but also the feasibility of saliva samples as a practical method to determine the values of CK, AST and LDH.

The assays used in our study were validated in a previous report and showed an adequate imprecision and accuracy to measure the activity of the three enzymes in saliva. These assays are commercially available and can be used in spectrophotometric equipment; therefore, can be easily set-up in any laboratory. It is important to point out that in case of using assays for different manufacturers, an analytical validation and optimization of the assay would be recommended.

Supporting our first hypothesis, a significant increase in all muscle damage markers (CK, AST and LDH) in serum was observed 24 and 96 hours after the accentuated eccentric training protocol compared to pre-training values. Although small to moderate higher values of muscle damage markers were observed at Post96 compared to Post24 (ES ranged from 0.24 to 0.65), no significant differences were reached between them. CK, AST and LDH are enzymes commonly used as indicators of muscle damage during resistance training (Brancaccio et al., 2010, 2007; Friden & Lieber, 2001). It is known that the peak value of these enzymes are influenced by the intensity and type of exercise (Brancaccio et al., 2010). Several studies have shown higher values of CK in men compared to women likely due to their larger muscle mass, since men with higher muscle mass tend to report higher values of CK compared to men with less muscle mass (Brancaccio et al., 2010; Hunter, 2014; Raeder et al., 2016). However, no significant differences in the response of the muscle damage markers were evident in the present study between men and women and, consequently, we pooled the data of both sexes for statistical analyses. In line with our results, Clarkson et al. (Clarkson, Kearns, Rouzier, Rubin, & Thompson, 2006) reported a high variability in individual responses of CK, AST and LDH after a maximal eccentric contraction of the elbow flexors. The high inter-individual variability observed in the response to accentuated eccentric training protocols suggests that coaches cannot extrapolate the results reported in the literature to their athletes (Joonyoung & Joohyung, 2015; Koch et al., 2014) and highlight the recommendation of an individual monitoring of these biomarkers by comparing the values of the biomarkers with respect to the individual's baseline values.

Regarding our second hypothesis, contrarily to serum, only significant changes in saliva were found for CK at 96h in men, and the muscle damage markers

measured in saliva presented a very low level of agreement with respect to the same markers measured in serum. Deminice et al. (Deminice et al., 2010) examined the use of serum and saliva to assess oxidative stress after a resistance training session consisting of 3 sets of 10 repetitions at the 75%1RM with 90 seconds of inter-set rest time during several exercises. All markers examined in that study (uric acid, thiobarbituric acid reactive substances, lipid hydroperoxide, advanced oxidation protein products and glutation) showed a significant increase in serum and saliva, but only uric acid showed correlations between serum and saliva. Several studies have also explored the hormonal response in saliva. Mc Lellan et al. (2010) measured CK in serum and testosterone and cortisol in saliva reporting peak CK values 24 hours after a rugby match, while 5 days were necessary to return to baseline levels. Regarding the endocrine response, testosterone and cortisol returned to baseline levels after 48 hours of rest, moreover, showed strong correlation between serum and saliva, but the level of agreement between CK measured in serum and saliva was not explored. Our findings are in line with the results reported by Barranco et al. (2017) who in a pilot study showed no significant correlations between the values in serum and saliva of the three biomarkers of our study (CK, AST, and LDH) after an amateur futsal mach. However, in human with myocardial infarction and dogs with muscle damage, a moderate significant correlation in CK and AST were found between serum and saliva. The possible different kinetics of the enzymes in these processes, differences in severity and magnitude of the muscle damage, the different methods used for measurement or the fact that samplings were made at different times after the damage could be the reasons of the divergences of these reports with our study.

This lack of correlation between serum and saliva values found in our study could be to different causes such as different dynamics of the enzymes in serum and saliva, since it seems that in our study there is a need of more time to detect increases in saliva. Also, it could be due to the existence of a threshold for passing the enzymes from serum to saliva as occurs with other analytes such as NT-ProBNP (Foo et al., 2012; Dizgah & Sabet, 2011) or even the possibility of enzyme synthesis by the salivary glands (Tvarijonavičiute et al., 2017). Further studies should be made to clarify this and improve our understanding of the cause of the changes of muscle enzymes in saliva.

One limitation of this study is that only one type of sample collection (by passive flow) and one way to express the result was used. Therefore, future studies should explore if other saliva collection methods can provide the most accurate results and also examine saliva analysis controlled for salivary flow rate or total protein content. The number of individuals of our study was selected based on the minimum number of individuals needed to get an adequate statistical power, based on the inter-individual variability of CK in serum, that resulted in a value of 15 subjects. This size of the sample used in our study was in line or higher than other previous reports about evaluation of different biomarkers of serum or saliva after an acute exercise: $n = 9$ (Pantoja, Alberton, Pilla, Vendrusculo, & Krueel, 2009), $n=10$ (Twist & Eston, 2005), $n = 12$ (Chapman, Newton, Sacco, & Nosaka, 2006). However, the higher inter-individual variability of CK in saliva yield that a number of 60 individuals should have been used to get an appropriate power. Therefore, this report should be considered as a pilot study that should be confirmed with other studies involving a larger number of individuals. Finally, future studies should try to compare serum and saliva measurements to biopsy immunohistochemistry (gold-standard method to assess muscle damage) to determine which of the two methods (serum and saliva) provides a better representation of the muscle damage induced by physical exercise. In addition, studies involving longer time points would have been advisable in order to evaluate if there is a higher correlation between saliva and serum measurements after muscle damage at those time points.

10.6. PRACTICAL APPLICATIONS

Our findings provide new physiological data that could contribute to a more adequate strength training prescription. The high variability in the individual responses of CK, AST and LDH to an accentuated eccentric training protocol suggests that coaches cannot extrapolate the results reported in the literature to their athletes, being necessary an individual monitoring of these biomarkers. Coaches should also be aware that level of muscle damage markers measured in serum and saliva after a physical effort cannot be closely related. Consequently, saliva measurements should not be used to infer the values of muscle damage markers in serum in similar situations that were used in our report. Further studies should

be performed about muscle biomarkers in saliva before practitioners can use this sample to guide resistance training routines.

XI

Estudio V

XI/ ESTUDIO V

Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue

Brief running head: Failure vs. not to failure resistance training

*Journal of Strength and Conditional Research Under Review**

Jorge M González-Hernández^{1,2}, Amador García-Ramos^{3*}, David Colomer-Poveda², Asta Tvarijonaviciute⁴, José Cerón⁴, Pedro Jiménez-Reyes⁵, Gonzalo Márquez²

1 Faculty of Health Science, Universidad Europea de Canarias, Tenerife, Spain.

2 Department of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, Catholic University of Murcia (UCAM), Murcia, Spain.

3 Department of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Granada, Granada, Spain.

4 Department of Animal Medicine and Surgery, Faculty of Veterinary Medicine, Regional Campus of International Excellence 'Campus Mare Nostrum', University of Murcia, Spain.

5 Centre for Sport Studies, Rey Juan Carlos University, Madrid, Spain.

Corresponding author:

Jorge Miguel González Hernández, MSc, NSCA-CSCS,
Universidad Europea de Canarias,
Inocencio García 1, 38300
La Orotava,
Santa Cruz de Tenerife,
Canary Island,
Spain
ORCID 0000-0003-3835-7104

11.1. ABSTRACT

This study aimed to compare acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue between resistance training sessions leading or not to failure. Twelve healthy males completed two sessions which consisted of 6 sets of the full-squat exercise performed against the 10RM load. In a randomized order, in one session the sets were performed to failure and in the other session the sets were not performed to failure (5 repetitions per set). Mechanical fatigue was quantified through the recording of the mean velocity during all repetitions. Neuromuscular function of the knee extensors was assessed through the twitch interpolation technique before training, immediately after each set, and 1h, 24h and 48h post-training. Serum creatine kinase (CK) and aspartate aminotransferase (AST) were measured before training and 1h, 24h and 48h post-training to infer muscle damage. A higher velocity loss between sets was observed during the failure protocol (-21.7%) compared to the non-failure protocol (-3.5%). Peripheral fatigue was higher during failure than non-failure protocol ($p < 0.05$). Voluntary activation remained depressed up to 48h (~-7.5%) regardless of the training protocol, indicating the persistence of central fatigue. Failure protocol induced higher muscle damage than non-failure protocol, which lasted up to 48h post-training (CK: +111.9%; AST: +27.6%; $p < 0.05$). Changes in CK and MVC were also correlated. This study highlights that failure protocol produced a greater extent of peripheral fatigue compromising the excitation-contraction coupling machinery and thus, performance.

Keywords: Central Fatigue, Peripheral Fatigue, Squat Exercise, Creatine Kinase, MPV

11.2. INTRODUCTION

Resistance training (RT) is widely used to induce strength, power and hypertrophy adaptations (Davies et al., 2015; Grgic, Lazinica, Mikulic, Krieger, & Schoenfeld, 2017; Soriano et al., 2015). The configuration of the RT stimulus (volume, intensity, inter-set rest, etc.) influences acute mechanical, neuromuscular, and biochemical responses (Río rodríguez, Iglesias soler, & Fernández, 2016) and,

consequently, the long-term neuromuscular adaptations (Adams et al., 2002). One of the factors that most influences the metabolic and mechanical demands of RT sessions is the number of repetitions performed in a set with respect to the maximum number of repetitions that can be completed (González Hernández et al., 2017; Gorostiaga et al., 2014; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Although some studies support training to failure to maximize the gains in muscle hypertrophy and maximal strength (Ahtiainen et al., 2003; Drinkwater et al., 2005; Schoenfeld et al., 2017), other studies revealed that training to failure does not provided greater gains in maximal strength compared to non-failure training (Folland et al., 2002; Nóbrega & Libardi, 2016; Sampson & Groeller, 2016). For example, Pareja Blanco et al. (2016) demonstrated that a higher velocity loss (i.e., failure or near to failure training) induced a greater hypertrophic response, while a lower velocity loss (i.e., not-failure training) prevented the reduction of the fastest IIX fiber-type pool and resulted in similar or even superior increases in strength performance.

It is well documented that performing repetitions to failure causes a significant reduction of ATP and PCr stores, decreases the size of muscle total adenine nucleotide pool, and increases the accumulation of lactate and inosine monophosphate in the muscles and the levels of uric acid in the blood (Gorostiaga et al., 2012). In addition to these metabolic responses, it is also known that a training to failure protocol induces higher muscle damage (e.g., increased levels of creatine kinase [CK] and aspartate aminotransferase [AST]) compared to non-failure protocols (Gonzalez Badillo et al., 2016; Navarro et al., 2017). This is an important advantage for non-failure RT protocols because they could allow athletes to perform more frequent high-quality RT sessions.

However, although many studies have compared the acute responses of failure and non-failure training protocols (Gorostiaga et al., 2014; Izquierdo, Ibañez, González Badillo, et al., 2006; Navarro et al., 2017; Pareja Blanco et al., 2016), the neural mechanisms underlining the decline in performance following RT are not well understood. In this regard, the higher metabolic stress and muscle damage induced by RT protocols leading to failure are expected to induce a high peripheral fatigue (Marquez et al., 2016; Schott, McCully, & Rutherford, 1995). Furthermore, the greater accumulation of metabolic by-products such as hydrogen (H⁺) and

inorganic phosphate (Pi) after failure protocols (Gorostiaga et al., 2012) might also affect the capacity of the central nervous system to voluntarily recruit the motoneurons (i.e., central fatigue) due to an elevated firing frequency of afferent group III/IV (Carroll et al., 2016; Gandevia, 2001; Macgregor & Hunter, 2018). Therefore, it is plausible to speculate that failure and non-failure training protocols would induce different levels of peripheral and central fatigue. However, the acute and delayed central and peripheral fatigue have never been compared between failure and non-failure training protocols.

The primary aim of the present study was to compare the acute (after each training set) and delayed (1 h, 24 h and 48 h post-training) effect of failure and non-failure protocols on peripheral and central fatigue. The secondary aim was to relate the changes in the neuromuscular function with mechanical performance (velocity loss during training and maximal isometric strength) and muscle damage (i.e., CK and AST). The findings of the present study may help to explain the mechanism underpinning the impairments in performance observed in previous studies after protocols leading or not to failure (Gonzalez Badillo et al., 2016; Izquierdo, Ibañez, González Badillo, et al. 2006).

11.3. METHODS

11.3.1. Experimental approach to the problem

A repeated-measures design was used to compare acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue between RT sessions leading or not to failure (Figure 20). Each subject was involved in four sessions (two familiarization sessions and two experimental sessions). All sessions were separated by one week and were performed at the same time of the day for individual subjects and under constant environmental conditions (20-22°C and 55-60% relative humidity). Subjects demonstrated a proper technique during the full squat (SQ) exercise and the 10RM load (the load that induced failure after 10 repetitions) was determined in the second familiarization session. During the familiarization sessions, subjects were also required to perform two maximal voluntary isometric contractions (MVCs) with and without electrical stimulation

in order to familiarize them with the neuromuscular function test.

The two experimental sessions (failure and non-failure protocols) were performed in a counterbalanced order. Each session consisted of 6 sets of the SQ exercise performed in a free weight squat rack (Homcom, Barcelona, Spain) against the 10RM load ($\sim 75\%$ of 1RM) with 5 min of inter-set rest. The RT protocols only differed in the number of repetitions performed per set. In the failure protocol the sets were performed to failure, while in the non-failure protocol approximately half of the maximum possible number of repetitions (i.e., 5 repetitions) were performed in each set. Subjects were instructed to perform the concentric phase of all repetitions as fast as possible, and the eccentric phase at a controlled self-selected velocity. Prior to the RT sessions, a standardized warm-up was performed, that included jogging, joint mobility exercises, two sets of eight repetitions in the unloaded SQ exercise, five progressive countermovement jumps, 2 SQ repetitions against the 10RM load, and 3 MVCs. The procedures used for obtaining the dependent variables of the study (mechanical, neuromuscular and biochemical variables) are described below.

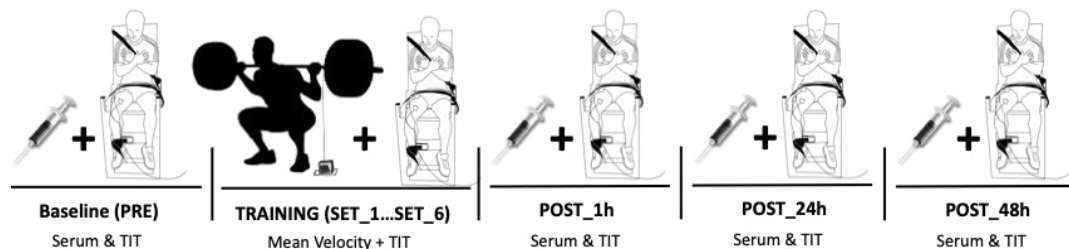


Figure 20. Overview of the experimental protocol. Neuromuscular function and biochemical variables were measured before training (Pre) and 1 hour (Post_1h), 24 hours (Post_24h) and 48 hours (Post_48h) post-training following failure and non-failure protocols with the full squat exercise. TIT, twitch interpolation technique.

11.3.2. Subjects

Twelve male sport science students (age = 23.6 ± 1.5 years; height = 178.2 ± 6.6 cm; body mass: 76.5 ± 9.9 kg; SQ 1RM = 91.8 ± 16.7 kg; SQ 10RM = 69.6 ± 11.9

kg) with at least one year of RT experience participated in this study. Subjects gave their written informed consent to participate in this study, which was approved by the local ethics committee and conducted in agreement with the last version of the Declaration of Helsinki. None of the participants reported any history of injuries or neuromuscular disorders that could influence the results of the present study. Subjects were required to refrain from consuming caffeinated or alcoholic drinks or exercise 48 h before and after each experimental session.

11.3.3. Procedures

1. Mean velocity during training

The mean velocity (MV) of the bar was recorded during all repetitions with a validated linear position transducer (Chronojump, Barcelona, Spain) which sampled the displacement-time data at 1,000 Hz (Perez Castilla, Piepoli, Delgado García, Garrido Blanca, & Garcia Ramos, 2020). The highest MV value of each set was used for statistical analyses.

2. Neuromuscular function

The twitch interpolation technique was used to assess voluntary activation and muscle contractile properties. For this purpose, subjects were seated in a custom made chair with both knees flexed at 90° and the torso restrained with belts to avoid any displacement. The right leg was strapped to a force transducer (NL63-200 Kg; Digitimer, Welwyn Garden City, United Kingdom) just above the malleoli. Transcutaneous electrical muscle stimuli (200 μ s) were delivered using a constant-current stimulator (DS7AH, Digitimer Ltd, Welwyn Garden City, Hertfordshire, United Kingdom). Rectangular (5 × 9 cm) self-adhesive surface electrodes (Valutrode®, Axelgaard Manufacturing Co, Lystrup, Denmark) were placed proximally (over the upper third of the muscle) and distally (just above the patella) over the knee extensors. Single stimuli were delivered to the relaxed muscle beginning at 100 mA and increasing by 20 mA until a plateau occurred in twitch amplitude. Supramaximal stimulation was ensured by increasing the final intensity by 30% (mean current = 339 ± 36 mA).

The same measurements were performed before training (Pre), 30 seconds

after each set, and 1 h (Post_1h), 24 h (Post_24h) and 48 h (Post_48h) post-training. Subjects performed two MVCs of 3 seconds during the knee extension exercise separated by 1 minute of rest. However, after the training sets only one attempt was performed. During each MVC, a high-frequency doublet (100 Hz) was superimposed at 1.5 seconds to determine central fatigue. Afterwards, a potentiated 100 Hz doublet, a 10 Hz doublet and a single twitch were delivered at rest 5, 6.5 and 8.5 seconds after the beginning of the MVC, respectively.

Global fatigue was determined by the value of maximal force (F_{max}) reached during the MVC. Only the trial at Pre and Post with higher F_{max} was considered for statistical analyses. The indices of peripheral fatigue were the mechanical responses to single stimulations (peak twitch, T_w), potentiated high- and low-frequency doublet (Db100 and Db10, respectively), and the ratio of paired stimulation peak forces at 10 Hz over 100 Hz (10:100 ratio). Central fatigue was evaluated by measuring voluntary activation (VA). In line with Giandolini et al. (2016), VA was calculated from the maximal force attained during the MVC (F_{max}), the force just before the superimposed doublet (F_{before}), the peak force following the superimposed doublet (Db100sup), and Db100 as follows:

$$VA = [1 - ((Db100sup - F_{before}) \times (F_{before} / F_{max})) / Db100] \times 100$$

3. Biomarkers of muscle damage

Muscle damage markers (CK and AST) were inferred via serum measures before training (Pre) and 1 h (Post_1h), 24 h (Post_24h) and 48 h (Post_48h) post-training. Blood extractions were always collected in the morning between 8:00-8:30 AM. The only exception was Post_1h which was collected one hour after training. Blood was drawn by conventional clinical procedures from the antecubital vein into plain tubes (5 ml). Plain tubes were centrifuged at 2000 g during 10 minutes for careful removal of the serum and the samples were frozen at -80°C until the analysis was performed.

Serum CK and AST were analyzed using commercially available kits (Beckman Coulter, Brea, United State of America). The assay for CK measurements was based on the quantification of the Nicotinamide Adenine Dinucleotide

Phosphate (NADPH) formation derived from the action of CK on the creatine phosphate and Adenine Diphosphate (ADP). The assay for AST measurements was based on the quantification of the NADPH consumption derived from the action of AST over aspartate and oxoglutarate. These processes were carried out as recommended by the International Federation of Clinical Chemistry. The calibrators used were provided by the manufacturer of the commercial kits. The assays were performed on an automated biochemical spectrophotometry analyzer (Olympus A400, Beckman Coulter, Brea, USA).

11.3.4. Statistical analysis

Firstly, between-session reliability was calculated for MVC, Db10Hz, Db100Hz, Tw, 10:100 Ratio, VA (%), CK and AST considering the PRE measurements of both experimental sessions using intra-class correlation coefficients (ICCs) from the mixed-effect model. The ICC was interpreted with values below 0.5 indicating low reliability, values between 0.5 and 0.75 indicating moderate reliability, values between 0.75 and 0.9 indicating good reliability, and values higher than 0.90 indicating excellent reliability (Koo & Li, 2016). Then, the Shapiro-Wilk analysis was used to test for normal distribution of the data. In all cases where raw data deviated from normality, a log transformation was applied prior to further statistical testing.

Two-way repeated measures analysis of variance (RM-ANOVA) with the PROTOCOL (failure and non-failure) and TIME (Pre, Set_1, Set_2, Set_3, Set_4, Set_5, Set_6, Post_1h, Post_24h and Post_48h) as factors were performed for the following variables: MVC, Db10Hz, Db100Hz, Tw, 10:100 ratio and VA. For the biochemical variables (CK and AST), the factor TIME only included Pre, Post_1h, Post_24h and Post_48h time points. For the MV, the factor TIME only included Set_1, Set_2, Set_3, Set_4, Set_5, and Set_6. In order to evaluate the acute effects when the volume is matched (i.e., after 30 repetitions), we compared the values of several variables (MVC, VA, Tw, Db10Hz, Db100Hz and 10:100 ratio) obtained after the Set_3 of the failure protocol against the values obtained after the last set of the non-failure protocol. For this purpose, we performed a RM-ANOVA with PROTOCOL (failure and non-failure) and TIME (Pre and Post_30reps) as factors. The assumption of Sphericity was tested with the Mauchly's test. In cases where

the assumption of Sphericity was violated, the Greenhouse-Geisser correction was applied. In case of significant F-values ($p \leq 0.05$), post-hoc analysis was performed using paired comparisons with Bonferroni correction.

Finally, Pearson's correlation coefficients (r) were calculated to determine the relationship between the changes in neuromuscular function (VA, Db10, Db100, 10:100 ratio and Tw) and the changes in MVC, CK and AST post-training (Post_1h, Post_24h and Post_48h). Statistical analyses were performed using a commercially available software (SPSS 23.0, IBM Corp. IBM SPSS Statistics for Windows, Armonk, NY, USA).

11.4. RESULTS

11.4.1. Reliability of baseline values

Good to excellent between-session reliability was observed for all variables with ICCs ranging from 0.766 to 0.959 (all $p < 0.01$). The only exception was the 10:100 ratio that showed moderate reliability (ICC = 0.671, $p = 0.039$). Furthermore, no significant differences in PRE values were observed for any variable, indicating similar baseline values for both experimental conditions.

11.4.2. Mean velocity during training

The analysis showed that MPV was reduced in the last set (6th) of the failure protocol when compared to the first repetition of the training session (0.73 vs. 0.57 m·s⁻¹; $p < 0.05$), but remained unaltered in the non-failure (0.73 vs. 0.69 m·s⁻¹; $p > 0.05$). Furthermore, the MPV differed between protocols in the last two sets of the training ($p < 0.05$ for all comparisons; Table 13).

11.4.3. Neuromuscular function

Both RT protocols showed a lower MVC after all sets and Post_24h compared to PRE values ($p < 0.05$; Table 13). All the markers of peripheral fatigue (i.e., Db100, Db10, Tw and the 10:100 ratio) were also reduced after both RT protocols from the

1st set until Post_1h in comparison with PRE values ($p < 0.05$; Table 13). Of note is that the reduction of peripheral markers was significantly higher after the failure protocol when compared to non-failure protocol from the 3rd to the 6th set ($p < 0.05$; Table 13). The VA showed a reduction after both RT protocols from the 1st set till Post_48h when compared to PRE values ($p < 0.05$; Table 13) indicating the persistence of central fatigue even after two days of recovery.

Table 13. Comparison of mechanical, neuromuscular and biochemical variables between training sessions leading or not to failure.

Variables	Protocol	TIME POINTS										ANOVA		
		Pre	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Post_1h	Post_24h	Post_48h	Protocol	Time	
Mechanical														
MV (m·s ⁻¹)	Non-failure	-	0.7 (0.06)	0.7 (0.05)	0.7 (0.05)	0.6 (0.03)	0.6 (0.06)	0.69 (0.07)	-	-	-	F = 15.2 P = 0.002	F = 7.3 P = 0.002	F = 4.2 P = 0.018
	Failure	-	0.7 (0.08)	0.6 (0.07)	0.6 (0.09)	0.6 (0.10)	0.6 (0.12)	0.57 (0.10)	-	-	-			
Neuromuscular														
MVC (N)	Non-failure	61 (18)	54 (11)	52 (10)	49 (10)	47 (11)	489 (10)	470 (11)	510 (111)*	522 (101)*	547 (74)	F = 3.9 P = 0.075	F = 14.9 P = 0.001	F = 0.4 P = 0.948
	Failure	60 (28)	52 (13)	49 (13)	47 (12)	43 (13)	444 (118)*	431 (118)	464 (118)*	491 (108)*	508 (135)			
Db10 0Hz (N)	Non-failure	28 (4)	23 (32)*	23 (30)*	22 (30)*	22 (32)*	215 (30)*	207 (26)*	230 (31)*	246 (35)	267 (23)	F = 17.9 P = 0.001	F = 28.4 P = 0.001	F = 2.2 P = 0.028
	Failure	28 (4)	23 (30)*	21 (30)*	20 (38)*	19 (34)*	189 (28)*	188 (36)*	229 (39)*	246 (41)	258 (40)			
Db10 Hz (N)	Non-failure	25 (3)	18 (36)*	18 (32)*	17 (31)*	16 (31)*	158 (34)*	151 (31)*	186 (34)*	218 (47)	255 (34)	F = 21.1 P = 0.001	F = 78.2 P = 0.001	F = 3.7 P = 0.031
	Failure	26 (4)	18 (39)*	17 (38)*	14 (36)*	13 (31)*	125 (29)*	119 (31)*	169 (39)*	209 (41)	238 (47)			
Tw (N)	Non-failure	19 (3)	15 (34)*	14 (30)*	14 (29)*	14 (32)*	137 (29)*	128 (28)*	151 (34)*	165 (37)	190 (27)	F = 3.5 P = 0.090	F = 34.5 P = 0.001	F = 3.1 P = 0.041
	Failure	20 (4)	14 (25)*	14 (23)*	13 (34)*	11 (26)*	115 (28)*	110 (29)*	148 (37)*	167 (32)	183 (38)			

10:10 0 (%)	Non - failu re	92 .4 (4.8)	80. 9 (7.0)*	77. 9 (6.4)*	77. 2 (6.4)*	75. 4 (6.8)*	73. 7 (8.3)*	73.1 (7.2)*	81.8 (9.6)*	88.3 (8.4)	95.8 (8.1)	F = 10.2	F = 42.7	F = 2.4
	Fail ure	94 .0 (8.8)	81. 7 (8.5)*	78. 2 (9.1)*	71. 5 (7.6)*	68. 4 (7.4)*	66. 4 (7.2)*	62.9 # (5.7)*	73.7 (6.7)*	86.0 (9.8)	92.6 (7.6)	P = 0.009	P = 0.001	P = 0.016
VA (%)	Non - failu re	92 .4 (5.0)	85. 0 (10.4)*	85. 3 (8.0)*	82. 8 (10.9)*	81. 5 (10.9)*	84. 9 (9.0)*	81.8 (11.6)*	86.5 (7.8)*	88.1 (6.6)*	85.4 (8.9)*	F < 0.1	F = 7.8	F = 0.4
	Fail ure	93 .2 (7.9)	87. 2 (12.1)*	83. 4 (14.3)*	83. 7 (12.1)*	79. 8 (13.4)*	83. 4 (10.1)*	83.7 (9.7)*	87.2 (5.9)*	86.7 (9.0)*	86.4 (10.2)*	P = 0.963	P = 0.001	P = 0.925
Biochemical														
CK (UI/ L)	Non - failu re	23 3 (1.38)	-	-	-	-	-	-	295 (132)*	444 (421)	318 (223)	F = 1.0	F = 9.7	F = 0.6
	Fail ure	22 4 (155)	-	-	-	-	-	-	314 (184)*	532 (261)*	387 (175)*	P = 0.338	P = 0.003	P = 0.503
AST (UI/ L)	Non - failu re	30 .0 (14.9)	-	-	-	-	-	-	33.1 (16.1)*	33.4 (12.2)	30.8 (6.3)	F = 0.04	F = 8.3	F = 4.0
	Fail ure	28 .1 (15.5)	-	-	-	-	-	-	31.4 (17.7)*	38.0 (17.9)*	34.7 (16.4)*	P = 0.844	P = 0.001	P = 0.015

MV, mean velocity; MVC, maximal voluntary contraction; Db100Hz, potentiated doublet evoked at 100 Hz; Db10Hz, potentiated doublet evoked at 10 Hz; Tw, single twitch; VA, voluntary activation; CK, creatine kinase; AST, aspartate aminotransferase. *, significant differences compared to PRE values. #, significant differences compared to the non-failure protocol. Data depicted as means (standard deviations).

11.4.4. Biomarkers of muscle damage

Following the failure protocol, CK and AST values were significantly elevated from Post_1h to Post_48h ($p < 0.05$; Table 13). In contrast, after the non-failure protocol, both CK and AST were higher at Post_1h ($p < 0.05$) but not significant differences were observed at Post_24h o Post_48h ($p > 0.05$; Table 13).

11.4.5. The effects of a matched volume on fatigue-related variables

Subjects experienced similar impairments in MVC (failure = -28.7% and non-failure = -23.8%, $p < 0.05$ for both comparisons) and VA levels (failure = -10.1% and non-failure = -11.5%, $p < 0.05$ for both comparisons) (Figure 21). All the markers

of peripheral fatigue (i.e., T_w , Db10Hz, Db100Hz and 10:100 ratio) were reduced after both training protocols, but the magnitude of the reductions were higher for the failure protocol compared to the non-failure protocol for the Db10Hz (-54.8 vs. -41.5%) and 10:100 ratio (-33.1% vs. -20.9%) ($p < 0.05$ for both comparisons, Figure 21).

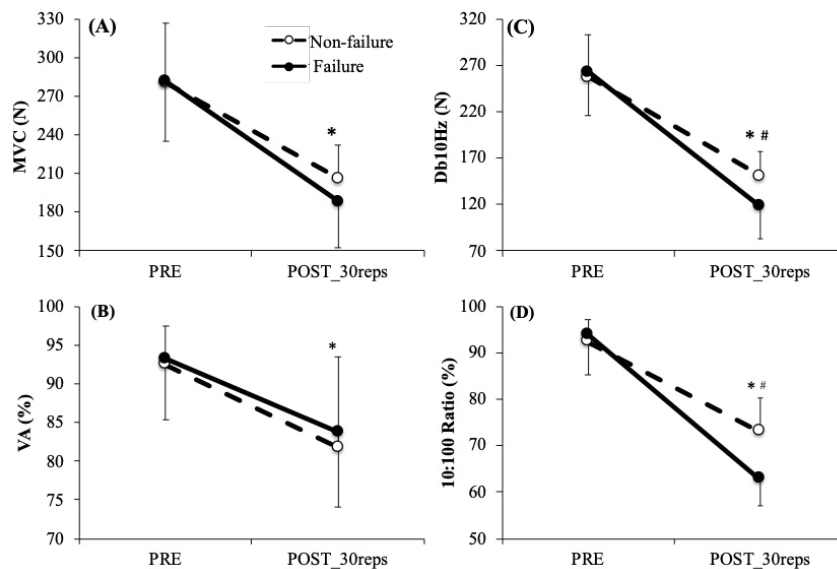


Figure 21. Comparison of maximal voluntary contraction (MVC; panel A), voluntary activation (VA; panel B), potentiated low- frequency doublet (Db10Hz; panel C) and the ratio of paired stimulation peak forces at 10 Hz over 100 Hz (10:100 ratio; Panel D) before (PRE) and after performing 30 repetitions (POST_30reps) between both training protocols. *, depicts significant differences from PRE values. #, shows significant differences between both training protocols. Data are depicted as means and standard deviations.

11.4.6. Correlation analysis

Non-failure protocol. The changes in the MVC were significantly correlated with those observed in the Db10Hz at Post_1h, Post_24h and Post_48h ($r = 0.813$, 0.812 and 0.566 respectively; all $p < 0.05$). Furthermore, the analysis also revealed that the changes in CK were associated with those of the MVC and Db10Hz ($r = -0.533$ and -0.645 respectively; both $p < 0.05$) at Post_1h. The remaining correlations did not reach statistical significance ($p > 0.05$).

Failure protocol. The changes in the MVC were significantly correlated with those observed in the Db10Hz at Post_1h, Post_24h and Post_48h ($r = 0.693, 0.753$ and 0.567 , respectively; all $p < 0.05$). Our results also revealed significant correlations between CK and MVC at Post_1h and Post_48h ($r = -0.548$ and -0.608 respectively; both $p < 0.05$). Moreover, VA changes were significantly associated with those observed in MVC at Post_24h and Post_48h ($r = 0.564$ and 0.569 , respectively; both $p < 0.05$). Finally, the analysis also showed significant correlations between the changes in CK and VA at Post_24h ($r = -0.552$; $p = 0.031$). The remaining correlations did not reach statistical significance ($p > 0.05$).

11.5. DISCUSSION

This study shows the acute and delayed effects of two RT protocols with different set configurations, leading or not to failure, on mechanical performance, central and peripheral factors of fatigue and biomarkers of muscle damage. The main findings were as follows: (i) only the failure protocols induced a marked decrease in MV during the 5th and 6th sets, (ii) both training protocols produced a significant loss of MVC that remained depressed even 24h post training, (iii) the failure protocol produced higher levels of peripheral fatigue in comparison to the non-failure protocol, (iv) the decrease in muscle contractile properties due to the peripheral fatigue was present 1 hour after training for both RT protocols; (v) VA was reduced even after 48h post-training indicating the inability of the nervous system to fully recruit the motor neuron pool, and (vi) the failure protocol induced higher levels of muscle damage than the non-failure protocol, as evidenced by the greater and more prolonged increase in both CK and AST biomarkers.

In accordance with previous research, the non-failure protocol allowed the maintenance of higher velocities than the failure protocol (García Ramos et al., 2020; Gonzalez Badillo, Manuel, Mora Custodio, & Rodríguez rosell, 2017; Pareja Blanco et al., 2016; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). A -21.7% and -3.5% velocity loss between sets were observed for the failure and non-failure protocols, respectively. The higher velocity loss observed during the failure protocol could be explained by the greater peripheral fatigue induced by this protocol when compared to the less physically demanding non-failure protocol. It is plausible that the failure

protocols leads to a higher reduction in Na⁺-K⁺ ATPase activity (Aughey et al., 2007) and impairs sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release and uptake (Leppik et al., 2004) as a result of the larger number of repetitions performed in comparison with the non-failure protocol. A longer time under tension may have a greater impact on the metabolic profile of the excitation-contraction coupling (Schott et al., 1995). Although both protocols induced low frequency fatigue (expressed as a reduction in the 10:100 ratio), it was more pronounced after the failure protocol than after the non-failure protocol. The failure protocol induced a proportionately greater loss of force at a low stimulation frequency of 10 Hz compared to using a higher stimulation frequency of 100 Hz. Low frequency fatigue results from increases in intracellular free Ca²⁺ ([Ca²⁺]_i) and this elevation in [Ca²⁺]_i activates processes that lead to a failure of excitation-contraction coupling and Ca²⁺ release (Chin & Allen, 1998). It is possible that the non-failure protocol induced a failure of Ca²⁺ release that could affect the shape of the force-Ca²⁺ curve for both low and high frequencies of stimulation. In contrast, the failure protocol could have affected even more the steepest part of the force-Ca²⁺ curve, where higher falls in the Ca²⁺ release produced a greater loss of tension at low frequencies of stimulation (Westerblad, Duty, & Allen, 1993).

Low frequency fatigue also played a key role in the changes observed in the MVC after both training protocols. This was evidenced by the correlations between the changes observed in the Db10Hz and those observed in the MVC at Post_1h, Post_24h and Post_48h. The amount of peripheral fatigue that occurs during a workout is a major contributor to the amount of muscle damage experienced post training, due to the effects of calcium ion accumulation in stimulating proteolytic enzymes that damage the inside of the cell membrane (Zhang et al., 2008). This is in agreement with the data obtained in the present study, which showed significantly higher CK and AST values after the failure protocol compared to the non-failure protocol. Indeed, our results are in line with those reported by Moran Navarro et al (2017) who revealed that CK concentration was the biochemical parameter most related to the mechanical variables (e.g.: bar velocity against a given load) measured following RT protocols leading or not to muscle failure.

When a superimposed electrical stimulation is applied to a peripheral nerve or motor point, it produces an increase in the force that can be voluntarily produced (Carroll et al., 2016). This is frequently used to assess the deficit in voluntary activation (Gandevia, 2001). Our results revealed that a single session of RT with a 10RM load led to a long-lasting depression of VA that lasted up to 48h. These results suggest that central fatigue affected the ability to voluntarily activate muscles likely due to a suboptimal motor unit recruitment, discharge rate or both (Gandevia, 2001; Howatson et al., 2015; Todd et al., 2004). This mechanisms have been previously reported after high-volume heavy strength training and eccentric training workouts (Marquez et al., 2016; Souron, Nosaka, & Jubeau, 2018; Thomas et al., 2018).

Since high volume workouts are associated with greater amounts of peripheral fatigue and muscle damage, (Marquez et al., 2016; Navarro et al., 2017) it seems plausible that there is a link between the amount of muscle damage that is produced in a workout and the amount of central fatigue that occurs. In this regard, our analysis revealed a significant correlation between the changes in CK and VA at Post_24h after the failure protocol. Furthermore, significant correlations were also found between the changes in VA and MVC at Post_24h and Post_48h after the failure protocol but not after the non-failure protocol. Therefore, it seems plausible that the abovementioned neuromuscular impairment that lasted up to 48 hours post-exercise stems from a feedback mechanism resulting from elevated III/IV afferent signaling that may lead to a decrease in firing rate of high threshold motor units (Macgregor & Hunter, 2018; Prasartwuth et al., 2005). Group III/IV afferents have been shown to impact cortical, subcortical and propriospinal motor outputs, as well as on the α -motoneuron at the spinal level, whilst also directly affecting motoneuron firing rates during muscle fatigue via reflex inhibition (Gandevia, 2001; Macgregor & Hunter, 2018).

A limitation of the present study is that the total volume of both protocols was not matched. However, a previous study indicated that training to failure, even when compared to a volume-matched not failure protocol, resulted in a significantly higher acute decline of neuromuscular performance assessed through the recording of movement velocity (Navarro et al., 2017). Furthermore, the complementary

analysis performed in the present study demonstrated that, even when the volume is matched (i.e., 30 repetitions), subjects experienced higher amounts of peripheral fatigue after the protocol that led to muscle failure. This reinforces the findings of previous studies that, independently of the volume, training to muscle failure might significantly slow down the recovery of biochemical homeostasis (i.e., CK) and mechanical performance (Gonzalez Badillo et al., 2016; Navarro et al., 2017). Future studies should test whether the manipulation of training volume may affect the delayed response of the central and peripheral markers of muscle fatigue after protocols leading or not to failure.

11.6. PRACTICAL APPLICATIONS

Our findings provide new physiological and neuromuscular data that could contribute to a more adequate strength training prescription. In summary, the current study revealed that a non-failure protocol is associated with less impairment in the muscle contractile properties compared to a failure protocol, which may explain the differences in MV during training. Furthermore, it was shown that the higher the peripheral fatigue the greater the amount of muscle damage experienced by the subjects. Indeed, both RT protocols led to a reduction in the MVC and a long-lasting depression (up to 48 hours) of the VA, showing the inability of the subjects to fully recruit the motor neuron pool. Therefore, coaches and athletes are encouraged to use non-failure protocols to reduce peripheral fatigue and muscle damage, while the central fatigue does not seem to be affected by the set configuration.

Acknowledgment

We are grateful to all the subject that took part in this study.

XII

Discusión general

XII/ DISCUSIÓN GENERAL

La presente tesis doctoral ha sido diseñada con la intención de explorar los efectos mecánicos, metabólicos, perceptuales, bioquímicos y neurológicos agudos y tardíos tras diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza. Como síntesis principal, nuestros principales hallazgos revelan diferencias significativas en cuanto a la fatiga producida en una sesión de entrenamiento de fuerza al utilizar descansos entre repeticiones. Además, es importante resaltar la utilización de la saliva como método válido para determinar el estrés metabólico producido tras el entrenamiento de fuerza. En contraposición, esta herramienta no presenta la misma fiabilidad cuando se pretende comprobar el grado de similitud los valores de diferentes marcadores de daño muscular entre suero y saliva tras una sesión de entrenamiento de fuerza con carácter excéntrico acentuado en sentadilla. En cuanto a la utilización de unos tiempos de recuperación entre series u otros, recuperaciones en torno a 1 minuto ha demostrado ser insuficiente para mantener el rendimiento de la sesión cuando se entrena con la mitad del carácter del esfuerzo en sentadilla y press de banca. Por otra parte, hemos reportado que en cuanto a la respuesta neurológica tras entrenar al fallo y no al fallo, a pesar de la diferencia en cuanto al volumen entre estos protocolos, la fatiga central persiste incluso hasta las 48h tras el entrenamiento de ambas configuraciones. Mientras que la fatiga periférica y el daño muscular es significativamente mayor tras el entrenamiento hasta el fallo. Por último, como novedad en esta tesis, se propone la pérdida de velocidad entre series como indicador de fatiga. A diferencia de los estudios anteriores donde se usa la pérdida de velocidad en la serie para el control de la fatiga durante el entrenamiento de fuerza. Estos resultados, sugieren que la gestión de las variables que configuran las series del entrenamiento de fuerza condiciona las respuestas agudas y tardías del entrenamiento.

A continuación, se presentan los principales hallazgos y cuestiones más relevantes de cada uno de los apartados en los que hemos clasificado la representación de la fatiga.

12.1. EFECTOS MECÁNICOS

12.1.1. La pérdida de velocidad

Habitualmente la manipulación de ciertas variables como el tiempo de recuperación entre repeticiones (García Ramos et al., 2020) o el carácter del esfuerzo (Gonzalez Badillo et al., 2016; Sánchez Medina & González Badillo, 2011) verán afectada la pérdida de velocidad durante el entrenamiento de fuerza. Por ello, esta evaluación de la fatiga ha sido considerada en tres de nuestras investigaciones como indicador de fatiga mecánica. En nuestro Estudio I, donde se compara la respuesta tras diferentes protocolos de fuerza en sentadilla, dos tradicionales de repeticiones continuas (TR1:3x10 y TR2: 6x5) y cuatro protocolos Cluster con recuperación entre repeticiones (CL1: 3x10[10], CL2: 3x10[15], CL3: 3x10[30] y CL4: 30 [15]). Se respaldó la idea de que la configuración de las series afecta en gran medida a la pérdida de velocidad de ejecución (Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Cumpliéndose nuestra hipótesis inicial, al comparar un protocolo tradicional basado en repeticiones continuas hasta el fallo muscular (TR1) con el resto de las configuraciones diseñadas (Un protocolo tradicional con la mitad del carácter del esfuerzo, y cuatro protocolos Cluster con diferentes tiempos de recuperación entre repeticiones), donde se pudo apreciar que estos últimos fueron capaces de mantener valores más altos de velocidad de ejecución a lo largo de la sesión. Nuestros resultados coinciden con estudios anteriores que han demostrado que la magnitud de la pérdida de velocidad puede atenuarse considerablemente introduciendo breves períodos de descanso entre las sucesivas repeticiones (Haff et al., 2008; Latella et al., 2019; Tufano, Brown, et al., 2016). En línea con el estudio de Hardee et al. (2012), quienes mostraron valores similares de potencia en el ejercicio de Power Clean cuando se aplicaron 20 y 40 segundos de descanso entre repeticiones, nuestros resultados indican que las configuraciones de la serie CL2 (15 segundos de descanso entre repeticiones) y CL3 (30 segundos de descanso entre repeticiones) son igualmente eficaces para mantener la velocidad media propulsiva dentro de la sesión de entrenamiento. Cabe señalar que 15 segundos de descanso entre repeticiones podrían ser preferibles a 30 segundos ya que reduce notablemente la duración de la sesión de entrenamiento. Otra propuesta interesante mostrada en esta investigación es el diseño de un protocolo que consistió en una única serie

de 30 repeticiones con 15 segundos de recuperación entre cada una de ellas. Algo parecido fue diseñado por Marshall et al. (2012) quienes determinaron un gran reclutamiento de unidades motoras a través de un método de descanso-pausa en el que los sujetos debían completar 20 repeticiones con un peso del 80%RM en media sentadilla. Cada vez que llegaban al fallo, recuperaban 20 segundos y seguían hasta completar todas las repeticiones propuestas. Aunque los efectos de nuestro protocolo son muy diferentes al permanecer siempre alejados del fallo, hemos podido comprobar como permite realizar gran número de repeticiones con una pérdida de velocidad del 21%, similar a la experimentada por el protocolo TR2, donde se realizaron 6 series de 5 repeticiones continuas. Al presentar respuestas agudas similares, nos preguntamos cómo serán las adaptaciones tras varias semanas de entrenamiento con ambos protocolos.

En nuestro Estudio III, se comparó la respuesta sobre la velocidad de ejecución para tres protocolos con diferentes intervalos de descanso entre series (Rec1:1 min, Rec3: 3min y Rec5: 5 min) durante una sesión de entrenamiento de fuerza (3 series de 5 repeticiones con la carga del 10RM) para los ejercicios de sentadillas y press de banca. Según la hipótesis planteada, el protocolo Rec1 donde se recuperaba 1 minuto entre cada serie, proporcionaría velocidades más lentas de ejecución durante la segunda y tercera serie en comparación con los protocolos Rec3 y Rec5 para los ejercicios de sentadilla y press de banca. Sin embargo, aunque también se formularon hipótesis sobre velocidades más rápidas para el protocolo Rec5 en comparación con Rec3, no se observaron diferencias significativas en la velocidad media entre estos protocolos (0,64 m/s vs 0,65 m/s respectivamente en sentadilla y 0,45 m/s y 0,46 m/s respectivamente en press de banca). Se esperaba un rendimiento de velocidad más bajo para el protocolo Rec1 porque los intervalos de descanso más largos aumentan la recuperación de ATP y PCr, mientras que se podría especular que los niveles de ATP y PCr podrían recuperarse después de 3 minutos, especialmente cuando las series de entrenamiento no se realizan hasta el fallo (Wells et al., 2009). Por lo tanto, aunque los protocolos Rec3 y Rec5 permitieron un rendimiento de velocidad comparable, el protocolo Rec3' se postula como más efectivo ya que la sesión de entrenamiento de fuerza en este caso es 6 minutos más corta. Resultados similares fueron obtenidos por Abdessemed et al. (1999), quienes reportaron una mayor concentración de lactato en la sangre y una menor producción

de potencia durante una sesión de entrenamiento de fuerza que consistió en 10 series de 6 repeticiones de press de banca con el 70%1RM usando intervalos de descanso entre series de 1 minuto, en comparación con los intervalos de descanso de 3 y 5 minutos. En nuestro estudio la magnitud de la carga (75%1RM) y la estrategia de entrenamiento (es decir, las series no realizadas hasta el fallo muscular) podrían haber influido en estos resultados, siendo plausible que el uso de cargas más pesadas o el hecho de dejar menos repeticiones en reserva, realizando en vez de 3 series de 5 repeticiones, por ejemplo 3 series de 8 repeticiones con el mismo peso (es decir, acercarse al fallo muscular). Esta modificación de la configuración de la serie requeriría un descanso entre series más largo para mantener el rendimiento de la velocidad durante las sesiones entrenamiento de fuerza. Sin embargo, en base a los resultados discutidos anteriormente (pérdida de velocidad de ejecución similar a los 5 minutos y menos tiempo de sesión), parece que 3 minutos de descanso entre serie es óptimo para el mantenimiento de velocidades de ejecución altas durante el entrenamiento de fuerza con los ejercicios de sentadilla y press de banca con cargas moderadas (75%1RM o 10RM) cuando se realizan aproximadamente la mitad del número máximo de repeticiones posibles por serie.

Por último, en nuestro Estudio V, se comparó la pérdida de velocidad de ejecución entre un protocolo al fallo y otro hasta el no fallo con la mitad de las repeticiones posibles (6x10 vs 6x5). De acuerdo con investigaciones anteriores (Gonzalez Badillo et al., 2017, 2016; Pareja Blanco et al., 2016; Sánchez Medina & González Badillo, 2011) el entrenamiento hasta el fallo generó una disminución significativa de velocidad de ejecución, al compararlo con el protocolo hasta el no fallo. En estas publicaciones y en nuestros estudios anteriores (Estudio 1 y Estudio 3) se observa la pérdida de velocidad en la serie, comparando la diferencia porcentual entre la repetición más rápida (suele ser la primera) y la más lenta de cada serie (suele ser la última). Según esta interpretación, la fatiga generada al final de la sesión se conocería al realizar un promedio entre las pérdidas de velocidades sufridas en cada una de las series. Fueron Sánchez Medina y González Badillo (2011) quienes propusieron esta excelente estrategia para cuantificar la fatiga en el entrenamiento de fuerza. Pero en esta metodología, no se contempla el estado del deportista a la hora de iniciar cada serie, puesto que a medida que aparece la fatiga, la repetición más rápida de cada serie, disminuye. Por lo tanto, es normal ver

cómo el valor de velocidad al inicio de cada serie no coincide, siendo más alto en la primera serie, sobre todo cuando se entrena hasta el fallo. En contra posición, el valor de la repetición mas lenta, si suele ser similar entre series, sobre todo al agotar todas las repeticiones posibles. Esto provoca, que las primeras series experimenten una pérdida de velocidad mayor que las últimas, puesto que hay mas diferencia entre la velocidad de la repetición más rápida y la más lenta de cada serie, pudiendo dar a entender que la primera serie genera más fatiga que la última.

Es entonces, cuando planteamos como alternativa o complemento, medir porcentualmente la pérdida de velocidad entre series, examinando el descenso de los valores de velocidad de ejecución entre las repeticiones más rápidas de cada serie (suelen ser las primeras repeticiones).

Pérdida de velocidad entre series (%) = 100 · (Velocidad de la primera repetición segunda serie – Velocidad de la primera repetición primera serie) / Velocidad de la primera

Fórmula 5. Pérdiad de velocidad entre series

De esta forma se tiene en cuenta como afecta la fatiga durante las recuperaciones y se puede observar como aumenta el valor de perdida de velocidad a medida que completamos más series. (Figura 22)

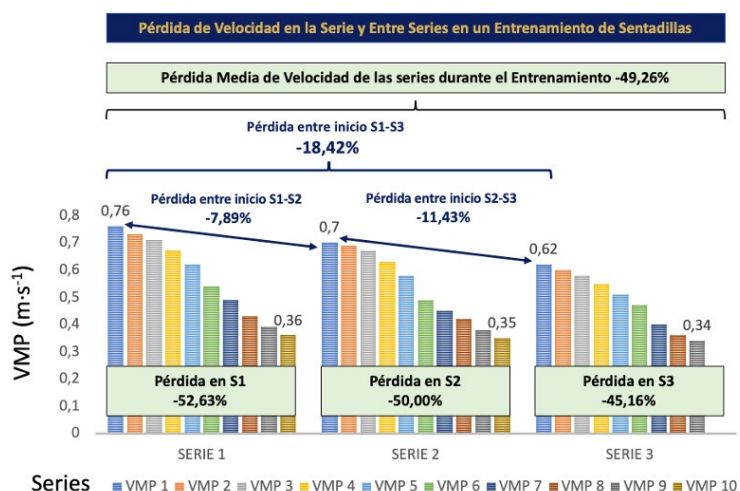


Figura 22: En esta figura se muestra el registro de las velocidades en un entrenamiento de fuerza en sentadillas de 3 series de 10 repeticiones con una recuperación de 5 minutos entre series, con el peso del 10RM (datos propios de nuestras investigaciones). En recuadro verde con letras negras, se muestra la pérdida de velocidad en la serie a partir de la idea propuesta por Sánchez Medina y González Badillo. Mientras que, en letras azul, se muestra nuestra propuesta de pérdida de velocidad entre series.

Esta propuesta de medición de fatiga no pretende ir en contra de la que ya conocemos, sino complementarla ya que se puede expresar la pérdida de velocidad en la serie y la pérdida de velocidad entre series. Consideramos que este método es más acertado cuando queremos tener en cuenta la capacidad de recuperación de deportistas entre una serie y otra, la cual se verá relacionada con el tiempo de recuperación utilizado. En nuestra investigación, el protocolo hasta el fallo indujo una pérdida de velocidad entre series de un -21,7%, mientras que el entrenamiento hasta el no fallo sólo provocó una reducción de un -3,5%. Estos valores no se pueden comparar con los reportados por configuraciones similares en otros estudios, donde al tener en cuenta la pérdida de velocidad en cada serie, el entrenamiento hasta el fallo muestra una reducción alrededor del -40%, mientras que el entrenamiento hasta el no fallo experimenta un descenso en torno al -20% (Gonzalez Badillo et al., 2016). Por lo tanto, la pérdida de velocidad entre series se puede contemplar como un novedoso método de cuantificación de la fatiga a nivel mecánico durante el entrenamiento de fuerza.

12.1.2. Pérdida de altura de Salto en CMJ

Junto a la pérdida de velocidad, otro indicador de fatiga mecánica comúnmente utilizado es la pérdida de altura de salto en CMJ. En el Estudio I, observamos una pérdida de la altura de salto en CMJ como consecuencia del aumento del número de series, midiendo este indicador tras cada serie. De acuerdo con los resultados obtenidos para la velocidad de ejecución, la mayor pérdida de altura de salto en CMJ a través de la media los saltos de cada serie se obtuvieron para el protocolo TR1 (17%), mientras que las configuraciones de CL2 y CL3 mostraron la menor reducción de la altura de salto en CMJ (4,5 y 4.7% respectivamente). Estos resultados apoyan aún más el uso de la pérdida de altura de salto para

cuantificar la fatiga neuromuscular (Jimenez Reyes et al., 2016; Morcillo et al., 2015; Sánchez Medina & González Badillo, 2011). Pero coinciden parcialmente a los encontrados por Mora Custodio et al. (2018), quienes propusieron tres protocolos de entrenamiento, uno de repeticiones continuas (CR) y dos con IRR (IRR10 e IRR20 segundos respectivamente), para realizar 3 series de 6,5,4 y 3 repeticiones con el 60,70, 75 y 80% del 1RM respectivamente en el ejercicio de sentadilla. Si atendemos al protocolo del 75% del RM en sentadilla, en este estudio realizaron 3 series de 4 repeticiones mientras que en nuestra investigación realizamos 3 series de 10 repeticiones. Estos investigadores reportaron menores valores de fatiga en cuanto a velocidad de ejecución (CR:26,9%; IRR10:14,1%; IRR20:11,3%) y altura de salto (CR:19,5%; IRR10:14,6%; IRR20:17,9%) para los protocolos con IRR frente a las configuraciones de repeticiones continuas, al igual que nosotros. Estos valores de pérdida de salto al final la sesión es mayor que los registraros por nosotros (TR1:13,3%; CL1[10s]:12,7%; CL2[15]:9,3%), quizás debido a que su investigación se recuperó 4 min y en el nuestro 5 min. Quizás, la diferencia en cuanto al numero de repeticiones (nosotros realizamos 6 repeticiones más por cada serie) y el tiempo de recuperación (4 min vs 5 min), sean los responsables de que ellos no hayan encontrado diferencias significativas entre los dos protocolos IRR y nosotros si.

Sorprendentemente, la menor reducción (2%) de la altura de salto en CMJ tras la finalización de la sesión de entrenamiento se observó después del protocolo CL4 (1 serie de 30 repeticiones con 15 segundos de descanso entre repeticiones). Ya otros estudios (Boullosa et al., 2013; Dello Iacono et al., 2019) han encontrado PAP tras la propuesta del entrenamiento Cluster, pero a diferencia de en nuestro estudio, Boullosa et al. (2013) utilizaron una carga muy superior (5RM) y un mayor tiempo de recuperación entre repeticiones (30") para el protocolo Cluster que compararon con una serie de 5RM en media sentadilla. Los resultados de este estudio mostraron cómo al minuto de terminar ambos protocolos, la configuración en Cluster produjo mejoras significativas en cuanto a la altura de salto en CMJ, mientras que a los 9 minutos la mejora fue para el protocolo tradicional de 5RM. Esto sugiere que el equilibrio fatiga/descanso que ofrece el trabajo con IRR y cargas elevadas puede conducir a la PAP. Esta idea ha sido respaldada por Dello Iacono et al. (2019) quienes compararon dos protocolos, uno tradicional de 3 series de 6 repeticiones y otro Cluster con de 3 series de 6 repeticiones con 20 segundos

cada dos repeticiones en el ejercicio de Jump Squat con la carga óptima de salto. Estos investigadores reportaron PAP a los 30 segundos 4 y 8 minutos para ambos protocolos, pero la configuración Cluster presentó mayores niveles en cada uno de estos puntos temporales.

Por lo tanto, podemos resumir que en función de cómo gestionemos la configuración de las series, la altura de salto de CMJ puede ser utilizada para medir fatiga o potenciación. Nuestros resultados se asemejan con lo que hemos encontrado en la literatura, donde configuraciones continuas al fallo similares a la propuesta que hemos planteado, induce una significativa pérdida de altura de salto junto con un decremento en la velocidad de ejecución (Párraga Montilla et al., 2018) mientras que las configuraciones Cluster presentaron un menor descenso para estas dos variables mecánicas (Mora Custodio et al., 2018).

12.1.3. Perfil Fv

El perfil Fuerza velocidad únicamente ha sido evaluado en nuestra tesis durante el Estudio III. El cuál recordamos que consistió en comparar 3 protocolos diferentes en cuanto al tiempo de recuperación entre series (1, 3 y 5 minutos) durante 3 series de 5 repeticiones con la carga del 10RM, para los ejercicios de press de banca y sentadilla. Hasta donde sabemos, este ha sido el primer estudio que ha utilizado la relación F-v para cuantificar la fatiga inducida tras una sesión de entrenamiento de fuerza en F0, v0 y Pmax con la mitad del carácter del esfuerzo en sentadilla. Planteamos la hipótesis de que se observaría un descenso significativo de estas variables después de cada una de las sesiones de entrenamiento de fuerza planteadas, siendo el descenso aún mas acentuado durante intervalos de descanso entre series más cortos. Esta hipótesis sólo fue confirmada parcialmente ya que después de las sesiones de fuerza se observó una disminución significativa para F0 y Pmax, pero no en v0. Sin embargo, la falta de cambio significativo para v0 se encuentra en línea con el estudio de García Ramos et al. (2018) quienes reportaron un descenso significativo en F0 pero no en v0 después de que las sesiones de fuerza no se realizaran hasta el fallo durante el ejercicio de press de banca. Por lo tanto, reducir el nivel de esfuerzo realizando aproximadamente la mitad del número máximo de repeticiones por serie parece una estrategia apropiada para preservar

la capacidad de la v_0 . Aunque la disminución de la velocidad media durante el entrenamiento fue mayor para el protocolo de Rec1 la magnitud del deterioro de los parámetros de la relación F-v después del entrenamiento no difirió entre los tres protocolos de este estudio. La ausencia de diferencias en la fatiga residual inducida por las sesiones de entrenamiento podría explicarse debido a que tras 10 minutos de descanso, la recuperación de los factores bioenergéticos como el ATP y el PCr debería ser similar para los tres protocolos de descanso entre serie (Wells et al., 2009; Willardson & Burkett, 2005).

12.2. EFECTOS METABÓLICOS

El análisis de la concentración de lactato como indicador de fatiga metabólica fue determinado en nuestro Estudio I. Pudimos comprobar cómo la respuesta de este metabolito ante cada configuración de la serie experimentó un comportamiento similar con respecto a las respuestas mecánicas (pérdida de altura de salto en CMJ y Velocidad de ejecución). A medida que se realizaban más repeticiones se indujo un aumento de la concentración de lactato en sangre, exacerbando estos valores (12 mmol/l) tras el protocolo TR1 (3x10(10)), pero no se observaron cambios significativos al acabar el entrenamiento de los otros protocolos. Este resultado indica que 5 minutos de descanso entre series fueron suficientes para minimizar el estrés metabólico en todos los protocolos analizados (entre 6 y 3 mmol/l), con la excepción del TR1(12 mmol/l), el cual se caracterizaba por entrenar hasta el fallo. De acuerdo con estudios anteriores, la inclusión de períodos de descanso más largos entre las repeticiones se asoció con concentraciones de lactato más bajas (Girman et al., 2014; Iglesias Soler et al., 2012; Mora Custodio et al., 2018).

En relación con el protocolo CL4 (30 repeticiones con 15 segundos IRR) hemos encontrado un aumento de la concentración de lactato de hasta 4mmol/ml relacionándose con una pérdida de velocidad de ejecución alrededor de un 21% al acabar el entrenamiento. Tufano et al. (2017) propusieron un protocolo similar, también en sentadilla y con el 75%RM pero consistió en 36 repeticiones con 12segundos IRR. En este estudio, los resultados mostraron una acumulación de lactato al acabar el entrenamiento de 7 mmol/ml y una pérdida de velocidad entorno a un 20%. Como podemos comprobar, a pesar de realizar 6 repeticiones

más que nuestro protocolo, nos llama la atención que, presentando una pérdida de velocidad de ejecución similar, exista una diferencia de casi el doble en cuanto a la acumulación de lactato. Esta discrepancia quizás sea debida a la diferencia entre las características de los sujetos que han tomado parte en cada estudio, pudiendo estar nuestros sujetos más familiarizados a entrenar con este tipo de cargas.

Por otro lado, cabe señalar que el estrés metabólico se considera uno de los principales mecanismos responsables de la hipertrofia muscular (Schoenfeld, 2013); en consecuencia, el menor estrés metabólico inducido por las configuraciones las series en Cluster con amplios tiempos de recuperación, podría no estar aconsejado cuando se requiera inducir adaptaciones hipertróficas (Girman et al., 2014; Oliver et al., 2015a). Según esta idea, el protocolo CL2 (15 segundos de IRR) puede ser preferible al protocolo CL3 (30 segundos de IRR) al inducir un mayor estrés metabólico con un rendimiento mecánico similar. Estos resultados evidencian que un protocolo u otro debe ser elegido en función de la respuesta que se quiera inducir.

12.3. EFECTOS PERCEPTUALES

La Percepción subjetiva del esfuerzo fue evaluada en nuestro Estudio I. Donde comprobamos el esfuerzo percibido tras dos protocolos de fuerza con repeticiones tradicionales continuas y otros cuatro con recuperaciones entre repeticiones. De acuerdo con los resultados obtenidos para las variables mecánicas (altura de salto CMJ y velocidad de ejecución), a medida que se completaban series, se producía un aumento de la fatiga percibida (es decir, mayores valores en la escala OMNI) durante todos los protocolos analizados. Como era de esperar, el protocolo TR1, caracterizado por llegar al fallo muscular, se asoció con la mayor fatiga percibida. Sin embargo, contrariamente a los resultados obtenidos de las variables mecánicas y metabólicas, el protocolo CL4 fue la segunda configuración de la serie más perceptiblemente fatigante, mientras que no se observaron diferencias entre las otras cuatro configuraciones de la serie restantes (TR2, CL1, CL2 y CL3). En el mismo estudio de Tufano et al. (2017) del que hablamos en el apartado anterior, también se evaluó la RPE al finalizar el protocolo de 36 repeticiones con 12 segundos IRR. Los resultados de percepción del esfuerzo para este protocolo fueron de un

valor de 8 sobre 10 en la escala OMNI, ligeramente por encima de los reportados por nuestros sujetos (7.5), tras realizar el protocolo CL4 (30 repeticiones con 12 segundos IRR). Aunque la diferencia no es grande, va en línea con los resultados encontrados en la acumulación de lactato, lo que puede respaldar la idea propuesta en el apartado anterior de que los sujetos de nuestro estudio acumularon menos lactato y percibieron menos esfuerzo al estar más adaptados a este tipo de esfuerzo.

Aunque la mayor fatiga percibida para los protocolos TR1 y CL4 podría atribuirse a sus sesiones de entrenamiento más cortas (11,5 y 8,75 min., respectivamente), estudios anteriores también han demostrado que las configuraciones de las series Cluster inducen una menor fatiga percibida cuando la duración total de la sesión se iguala con respecto al entrenamiento de repeticiones continuas tradicional (Mayo et al., 2014). En general, estos resultados confirman la utilidad de las diferentes configuraciones de la series en Cluster cuando el objetivo es reducir el grado de esfuerzo percibido (Hardee, Lawrence, Utter, et al., 2012; Mayo et al., 2014). Sin embargo, aunque fue eficaz en cuanto a los bajos niveles de fatiga mecánica y metabólica, el protocolo CL4 (1 serie de 30 repeticiones con 15 segundos de IRR) puede no ser adecuado para los sujetos novatos, ya que se percibió como muy estresante en comparación con otras configuraciones de la serie en Cluster.

12.4. EFECTOS BIOQUÍMICOS

Desde un punto de vista bioquímico, en esta tesis doctoral ha tomado protagonismo el estudio del ácido úrico como indicador de estrés metabólico y la CK, AST y LDH como biomarcadores de daño muscular. Es importante entender que el ácido úrico es un compuesto orgánico formado por carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno que se forma cuando el metabolismo desintegra las purinas al haberse producido una pérdida temporal de los depósitos musculares de ATP en la musculatura, acompañado de la producción de radicales libres (Gorostiaga et al., 2012; Hellsten & Norman, 1993). (Gorostiaga, et al., 2012; Westing, Norman, Balsom, & Sjodin, 1993). Por otro lado, tras un ejercicio intenso donde se ha producido un gran esfuerzo y nuestro organismo ha sufrido algún daño o desbalance, se produce una disrupción de las paredes celulares y se vierte al torrente sanguíneo diferentes

biomarcadores que indican el daño muscular sufrido (Brancaccio et al., 2010). Es por ello, que nuestra inquietud ha sido valorar la respuesta de estos analitos tras diferentes configuraciones del entrenamiento de fuerza, midiéndolos de forma tradicional en suero e intentar correlacionarlos con los datos obtenidos en saliva. El estudio del daño muscular y el estrés metabólico tras el entrenamiento de fuerza a partir de las muestras de saliva es poco usual en la literatura, a diferencia del estudio de hormonas como la testosterona y cortisol (Beaven et al., 2008; Hayes et al., 2015). Las extracciones de saliva suponen un menor coste económico y mayor facilidad para recolectar en comparación con el suero, además de ser una extracción e indolora, pero hemos visto que presenta diversas limitaciones. Quizás, debido a que la saliva está expuesta a diversos agentes externos como la comida y bebida, pudiendo alterar la concentración de los diferentes biomarcadores. La posibilidad de medir estos marcadores en saliva es debido a que en las glándulas salivales tiene lugar el transporte de proteínas e iones de la sangre a la saliva, especialmente a través de los vasos sanguíneos que nutren estas glándulas. Este enlace podría representar el puente entre el sistema vascular y la cavidad oral (Haekel & Häneke, 1996).

La respuesta del estrés metabólico tras el entrenamiento de fuerza ha sido medida en nuestro Estudio II. Ya en el año 2010, Deminice y colaboradores (Deminice et al., 2010), estudiaron la respuesta de diferentes marcadores de estrés oxidativo en suero y saliva tras una sesión de varios ejercicios realizando en cada uno de ellos 3 series de 10 repeticiones, con la carga del 75%RM. Los resultados de este estudio reportaron que entre los diferentes analitos, únicamente el ácido úrico incrementó significativamente tanto en suero (31,1%) como en saliva (47,6%) tras el entrenamiento. Lo que nos hace suponer que es debido a la gran capacidad oxidativa que presenta esta molécula, ya que constituye alrededor del 70% de la capacidad antioxidante de la saliva (Battino et al., 2002). Esta investigación nos motivó a valorar la respuesta tras un entrenamiento más exigente que otro, por lo que propusimos un entrenamiento hasta el fallo y otro hasta el no fallo (6x10 vs 6x5). Para comprobar la eficacia de diferentes métodos de recolección de saliva y de interpretación de los datos. Los resultados de nuestro estudio demuestran valores superiores para el protocolo hasta el fallo a los 60 min (Flujo pasivo fallo: 2,77 mg/dl vs Flujo pasivo no fallo 2,40 mg/dl) sin diferencias significativas entre protocolos

y se comprobó también que no existieron diferencias significativas al comparar salivette de algodón con flujo pasivo. Estos resultados están en concordancia con los obtenidos en publicaciones anteriores, en las que se utilizó salivette de algodón en 54 individuos (Chielle et al., 2017) y en el estudio con 83 sujetos en los que se utilizó flujo pasivo (Riis et al., 2018). Sin embargo, el coeficiente de correlación (r) que obtuvimos ($r=0.4344$ y $r=0.3728$) fue menor que el reportado por Kondakova et al. (1999) ($r = 0,76$). Estas diferencias podrían estar relacionadas con las distintas condiciones de los ensayos utilizados o con la existencia de una dinámica diferente en la respuesta del ácido úrico al ejercicio en el suero que en la saliva. En general, sería conveniente evaluar una población más numerosa para determinar las correlaciones entre flujo pasivo y la salivette de algodón con el suero.

El uso del salivette de algodón ha sido recomendado previamente en algunos estudios ya que, al utilizar los rollos de algodón, después de la centrifugación, la saliva contiene menos mucinas y pierde viscosidad, lo que facilita el procesamiento de las muestras (Lamey & Nolan, 1994). Sin embargo, puede alterar la composición de algunos analitos y, por lo tanto, el número de biomarcadores que pueden medirse con este procedimiento es limitado (Celec & Ostatníková, 2012; Kruger et al., 1996). En nuestro estudio no se encontraron diferencias entre el uso de salivette con algodón y flujo pasivo para la determinación del ácido úrico en la saliva, por lo que aparentemente ambos métodos podrían utilizarse para las mediciones de este biomarcador de estrés metabólico.

En cuanto a los diferentes procedimientos de normalización utilizados en nuestra intervención, los valores de ácido úrico no corregidos mostraron la mayor correlación con el suero (Salivette algodón: $r = 0.4344$; $p < 0.001$ y Flujo pasivo: $r = 0.3728$; $p = 0.031$). Cuando los resultados se corrigieron por el flujo o la concentración total de proteínas, los cambios en el ácido úrico después del ejercicio generalmente no se correlacionaron con los obtenidos en el suero. Esto concuerda con un estudio anterior en el que los valores no corregidos describieron con mayor precisión los cambios observados en la alfa-amilasa de la saliva en diferentes condiciones experimentales (Contreras Aguilar et al., 2017). Por lo tanto, nuestros resultados refuerzan las recomendaciones anteriores sobre la no normalización de las muestras a la concentración de proteínas en la saliva, al evaluar el nivel de estrés

tras el entrenamiento de fuerza.

En lo que se refiere al daño muscular, hemos elegido la CK, AST y LDH como indicadores de este efecto. Para ello, diseñamos una primera investigación, Estudio IV, en la que inducimos un esfuerzo exacerbado a través de un entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado con el 120% del RM en sentadilla. Tras 8 series de 10 repeticiones, evaluamos en suero y saliva el daño muscular a las 24 y 96h post. Con la intención de comprobar la dinámica de la respuesta para la CK, AST y LDH en suero y saliva y estudiar la posible fiabilidad de la saliva para detectar el daño muscular tras el entrenamiento de fuerza.

Los principales hallazgos de este estudio revelaron (I) un aumento significativo de los marcadores de daño muscular en Post 24h y Post 96h en comparación con los valores Pre en el suero, y (II) un bajo nivel de relación entre los mismos marcadores de daño muscular medidos en el suero y la saliva. Estos resultados ponen de manifiesto que los valores de los marcadores de daño muscular medidos en ambas muestras no están estrechamente relacionados y, por lo tanto, las mediciones de saliva no deben utilizarse para estudiar los valores de los marcadores de daño muscular tras el entrenamiento de fuerza excéntrico.

Apoyando nuestra primera hipótesis, se observó un aumento significativo de marcadores de daño muscular en el suero a las 24 horas (CK: 1439 UI/L, AST 60 UI/L y LDH:339UI/L) y a las 96 horas (CK: 2461 UI/L, AST 75 UI/L y LDH: 482UI/L) después del protocolo de entrenamiento excéntrico acentuado en comparación con los valores previos al entrenamiento. Aunque se observaron valores pequeños a moderadamente más altos de los marcadores de daño muscular en el Post 96h en comparación con el Post 24h (ES osciló entre 0,24 y 0,65), no se alcanzaron diferencias significativas entre ellos. La CK, la AST y la LDH son enzimas que se utilizan comúnmente como indicadores de daño muscular durante el entrenamiento de fuerza (Brancaccio et al., 2010, 2007; Friden & Lieber, 2001). Se sabe que el valor máximo de estas enzimas está influenciado por la intensidad y el tipo de ejercicio (Brancaccio et al., 2010). Varios estudios han mostrado valores más altos de CK en los hombres en comparación con las mujeres, probablemente debido a su mayor masa muscular, ya que los hombres con mayor masa muscular tienden a

reportar valores más altos de CK en comparación con los hombres con menor masa muscular (Brancaccio et al., 2010; Hunter, 2014; Raeder et al., 2016). Sin embargo, en el presente estudio no se observaron diferencias significativas en la respuesta de los marcadores de daño muscular entre hombres y mujeres y, en consecuencia, se agruparon los datos de ambos sexos para realizar análisis estadísticos. De acuerdo con nuestros resultados, Clarkson et al. (2006) informaron de una alta variabilidad en las respuestas individuales de CK, AST y LDH después de un entrenamiento de contracción excéntrica de flexión del codo. La alta variabilidad interindividual observada en la respuesta a los protocolos de entrenamiento excéntrico acentuado sugiere que los entrenadores no pueden extrapolar los resultados reportados en la literatura a sus atletas (Hortobágyi & Denahan, 1989; Joonyoung & Joohyung, 2015; Koch et al., 2014) y destacan la recomendación de una monitorización individual de estos biomarcadores comparándolos respecto a los valores de referencia del individuo.

En cuanto a nuestra segunda hipótesis, al contrario que en el caso del suero, sólo se encontraron cambios significativos en la saliva para la CK a las 96 horas en los hombres (81 UI/L), y los marcadores de daño muscular medidos en la saliva presentaron un nivel de concordancia muy bajo con respecto a los mismos marcadores medidos en el suero. Hasta donde llega nuestro conocimiento no existe un estudio que valore la respuesta de estos marcadores de daño muscular en sangre y saliva tras un entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado. Valorando otras actividades, nuestros hallazgos están en consonancia con los resultados reportados por Barranco et al. (2017), quienes en un estudio piloto no mostraron correlaciones significativas entre los valores en suero y saliva de los tres biomarcadores de nuestro estudio (CK, AST y LDH) después de un partido de fútbol aficionado. Sin embargo, en humanos con infarto de miocardio (Dizgah & Sabet, 2011) y perros con daño muscular (Tvarijonaviciute et al., 2017), se encontró una correlación moderadamente significativa en CK y AST entre el suero y la saliva. Las posibles diferencias cinéticas de las enzimas en estos procesos, las diferencias en la magnitud del daño muscular, los diferentes métodos utilizados para la medición o el hecho de que se tomaran muestras en diferentes momentos después del daño podrían ser las razones de las diferencias de estos trabajos con nuestros resultados.

Esta falta de correlación entre los valores de suero y saliva encontrados en nuestro estudio podría deberse a diferentes causas, como la diferente dinámica de las enzimas en el suero y la saliva, ya que parece que en nuestro estudio se necesita más tiempo para detectar aumentos en la saliva. También podría deberse a la existencia de un umbral para pasar las enzimas del suero a la saliva, como ocurre con otros analitos como el NT-ProBNP (Foo et al., 2012; Dizgah & Sabet, 2011) o incluso a la posibilidad de síntesis de las enzimas por las glándulas salivales (Tvarijonaviciute et al., 2017).

Tras la poca fiabilidad de la saliva para medir el daño muscular que nos encontramos en el Estudio IV, para el Estudio V decidimos no valorar esta metodología, y estudiar el daño muscular a través de la CK y AST en suero, tras dos protocolos de fuerza diferentes. Estas mediciones se realizaron 1, 24 y 48 horas post entrenamiento. Se sabe que el entrenamiento de fuerza excéntrico produce mayor daño muscular que el tradicional con énfasis en la fase concéntrica (Brancaccio et al., 2010). Nosotros hemos podido comprobar esta teoría al comparar los resultados de nuestras dos investigaciones, donde se reportando valores de CK a las 24h de (532 U/L \pm 261) para el protocolo convencional hasta el fallo con el 75%RM en el Estudio 5, frente a una respuesta exacerbada de (2142 U/L \pm 1778) registrada por lo hombres en el Estudio IV tras el entrenamiento excéntrico acentuado con el 120%RM.

En nuestro Estudio V valoramos la respuesta del daño muscular 1, 24 y 48 horas tras el entrenamiento de fuerza en sentadilla para dos protocolos, Fallo 6x10(10) vs no Fallo 6x5(10). Los resultados de este estudio mostraron que el entrenamiento que condujo al fallo indujo niveles más altos de daño muscular que el entrenamiento hasta el no fallo, debido al incremento de la CK y AST.

Los autores González Badillo et al. (2016), reportaron una correlación significativa entre la pérdida de velocidad de ejecución en la serie con el incremento de la CK a las post 48 horas ($r = 0.51$) tras un entrenamiento de fuerza hasta el fallo en sentadilla y pres de banca. En nuestra investigación, cómo mostramos en el apartado de las respuestas mecánicas, no valoramos la pérdida de velocidad en la serie como ellos, sino, la pérdida de velocidad entre series. Esta diferencia de la

metodología no supone una interpretación dispar, puesto que nuestros resultados se comportan de manera similar, donde el protocolo hasta el fallo presenta mayor pérdida de velocidad y acumulación de CK tras el entrenamiento que el entrenamiento hasta el no fallo.

Por otro lado, a diferencia de nuestros resultados, donde el pico de CK se encontró a las 24 horas para el entrenamiento hasta el fallo, Pareja Blanco et al. (2016) reportaron los valores máximos de este biomarcador a las 48 horas de un entrenamiento de fuerza hasta el fallo de 3 series de 12 repeticiones en press de banca y sentadilla. Esta diferencia quizás sea debido al diseño del estudio en donde se realizaba un ejercicio de miembro superior y otro de miembro inferior, mientras que en nuestro diseño únicamente medimos el ejercicio de sentadilla.

12.5. EFECTOS NEUROLÓGICOS

El estudio de los efectos del entrenamiento de fuerza desde un punto de vista neurológico fue evaluado en nuestro Estudio V, donde mostramos los efectos agudos y tardíos de dos protocolos de entrenamiento de fuerza con diferentes configuraciones de la serie, fallo vs. no fallo, sobre el rendimiento mecánico, fatiga central y periférica y daño muscular. Para ello, cómo hemos nombrado anteriormente, se diseñó un protocolo hasta el fallo de 6 series de 10 repeticiones y otro hasta el no fallo de 6 series de 5 repeticiones. Ambos con el peso del 75%RM en sentadilla y 5 minutos de descanso entre series. Los principales hallazgos fueron los siguientes: (I) aunque sólo el entrenamiento al fallo indujo una disminución significativa de la velocidad de ejecución entre series (-21,7 % vs -3,5%), ambos protocolos de entrenamiento produjeron una pérdida significativa en cuanto a la aplicación de fuerza durante una máxima contracción voluntaria (-29% vs -24%) de la musculatura extensora de rodilla. Esta variable permaneció afectada incluso 24 horas después del entrenamiento (-19% vs -16%); (II) como hipotetizamos, el entrenamiento hasta el fallo produjo niveles más altos de fatiga periférica en comparación con el entrenamiento hasta el no fallo (; (III) las deficiencias en las propiedades contráctiles del músculo debidas a la fatiga periférica estuvieron presentes 1 hora después de la ejecución de ambos protocolos de entrenamiento; (IV) La activación voluntaria se percibió afectada incluso después de 48 horas de

post entrenamiento, lo que indica la incapacidad del sistema nervioso para reclutar plenamente el conjunto de motoneuronas; (V) por último, los resultados actuales muestran que la configuración del entrenamiento hasta el fallo indujo niveles más altos de daño muscular que el protocolo hasta el no fallo, como lo demuestra el incremento significativo de los biomarcadores CK y AST después del protocolo de mayor exigencia, siendo el pico a las 24 h post (CK: 44s UI/L vs 532UI/L y AST: 33,4 UI/L vs 38UI/L).

Cómo ya hemos visto en los apartados anteriores, al comparar estos protocolos, el entrenamiento hasta el fallo produjo un decremento significativo en cuanto a la velocidad de ejecución durante la sesión y una mayor producción de biomarcadores de daño muscular a las 24 horas post entrenamiento. Estos resultados, se respaldan por las evidencias de nuestra intervención desde una perspectiva neurológica, donde el protocolo que completa todas las repeticiones posibles experimenta mayor fatiga periférica (Activación respecto al pre para el Ratio 10:100 post S6: 62,9% vs 73,1 %). La cantidad de fatiga periférica que se produce durante el entrenamiento es uno de los principales contribuyentes a la cantidad de daño muscular experimentado después del entrenamiento, debido a los efectos de la acumulación de iones de calcio en la estimulación de las enzimas proteolíticas que dañan el interior de la membrana celular (Zhang et al., 2008). Es plausible que el entrenamiento hasta el fallo dé lugar a una mayor reducción de la actividad de la ATPasa $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ (Aughey et al., 2007) y perjudique la liberación y absorción del retículo sarcoplásmico Ca^{2+} (Leppik et al., 2004) como resultado del mayor número de repeticiones realizadas en comparación con el entrenamiento hasta el no fallo. El tiempo bajo tensión más prolongado, experimentado por el protocolo 6x10 pudo haber contribuido con el aumento en el perfil metabólico del acoplamiento excitación-contracción (Schott et al., 1995). Aunque ambos protocolos indujeron fatiga de baja frecuencia (expresada como una reducción de la relación 10:100HZ al estimular la musculatura), esta fue más pronunciada después del entrenamiento hasta el fallo respecto a los valores registrados por la configuración menos exigente. El protocolo de mayor carácter del esfuerzo indujo una pérdida de fuerza proporcionalmente mayor a una frecuencia de estimulación baja (10 Hz) en comparación con una frecuencia de estimulación alta (100 Hz). La fatiga de baja frecuencia resulta del aumento del Ca^{2+} libre intracelular ($\text{Ca}^{2+}+i$) durante la

fatiga y estas elevaciones en $(Ca^{2+}+i)$ activan procesos que conducen a un fallo en el acoplamiento del proceso excitación-contracción y la liberación de Ca^{2+} (Chin & Allen, 1998). Es posible que el entrenamiento hasta el no fallo haya inducido un fallo en la liberación de Ca^{2+} que podría afectar a la forma de la curva fuerza- Ca^{2+} , tanto para las frecuencias bajas como para las altas. Por el contrario, el entrenamiento hasta el fallo pudo haber afectado más a la parte más pronunciada de la curva fuerza- Ca^{2+} , donde las mayores caídas en la liberación de Ca^{2+} produjeron una mayor pérdida de tensión a bajas frecuencias (Westerblad et al., 1993). Por último, la fatiga de baja frecuencia también desempeñó un papel fundamental en los cambios observados en la medición de la máxima contracción voluntaria después de ambos protocolos de entrenamiento. Esto fue evidente debido a las correlaciones entre los cambios observados en los Db10Hz y los observados en la aplicación de fuerza durante la contracción isométrica máxima después de 1h, 24h y 48h de entrenamiento.

Cuando una estimulación eléctrica superimpuesta sobre el nervio periférico o el punto motor produce un aumento de la fuerza voluntaria generada por el sujeto, muestra un déficit en la activación voluntaria. Nuestros resultados revelaron que una sola sesión de entrenamiento de fuerza con una carga de 10RM condujo a una afectación duradera de la activación voluntaria hasta las 48h. Estos resultados sugieren que la fatiga central afectó la capacidad de activación voluntaria de los músculos probablemente debido a un reclutamiento subóptimo de la unidad motriz, a la frecuencia de descarga o a ambas (Gandevia, 2001; Howatson et al., 2015; Todd et al., 2004). Esto se ha observado previamente tras un entrenamiento de fuerza con cargas altas y alto volumen y sesiones de entrenamiento excéntrico (Marquez et al., 2016; Souron et al., 2018; Thomas et al., 2018).

Dado que los entrenamientos de gran volumen están asociados con mayores cantidades de fatiga periférica y daño muscular (Marquez et al., 2016; Navarro et al., 2017), parece plausible que exista una relación entre la cantidad de daño muscular que se produce en un entrenamiento y la cantidad de fatiga central experimentada. En relación con esto, nuestro análisis reveló una correlación significativa entre los cambios en la CK y la activación voluntaria 24 horas después del entrenamiento hasta el fallo. Además, también se encontraron correlaciones significativas entre los cambios en activación y contracción voluntarias máxima 24 y 48 horas después del

entrenamiento hasta el fallo, pero no después del protocolo hasta el no fallo.

En resumen, partimos de la base de que el protocolo hasta el fallo produce gran cantidad de daño muscular por la exigencia que supone agotar todas las repeticiones posibles, en cambio, durante el entrenamiento hasta el no fallo las repeticiones se realizan con una carga elevada, a altas velocidades de ejecución. Esto activa mayor porcentaje de fibras rápidas y estas son más susceptibles al daño muscular. Por lo tanto, el daño muscular provocado en este protocolo daría lugar a un mayor feedback aferente que provocará una mayor inhibición selectiva de las unidades motoras de mayor umbral, comprometiendo la frecuencia de descarga de estas, viéndose reflejada en la fatiga central (Macgregor & Hunter, 2018; Prasartwuth et al., 2005).

XIII

Conclusiones

XIII/ CONCLUSIONES

■ Estudio I:

- Los diferentes protocolos de Cluster con tiempo de recuperación entre repeticiones que hemos estudiado (IRR 10, 15 y 30 segundos) han reportado significativamente menos fatiga mecánica, metabólica y perceptual tras una sesión de entrenamiento en sentadilla de 3 series de 10 repeticiones con la carga del 10RM que el entrenamiento tradicional de repeticiones continuas.
- Todos los protocolos de Cluster evaluados han conseguido mantener valores más altos de velocidad de ejecución durante las sentadillas en comparación con la configuración de series tradicional de repeticiones continuas. Lo que se traduce en un mejor rendimiento por sesión.
- Entrenar con la mitad del carácter del esfuerzo, sin llegar al fallo, produce mejor rendimiento durante la sesión y menor fatiga mecánica, metabólica y perceptual (fallo TR1: 3x10) vs no al fallo TR2:6x5)
- El protocolo Cluster con 30 s IRR presenta el mejor rendimiento y los valores más bajo de fatiga tras el entrenamiento. Pero no muestra diferencias significativas con el protocolo Cluster con 15 s IRR.
- El protocolo Cluster en sentadilla con 15s IRR obtienen prácticamente el mismo rendimiento y la misma fatiga generada que el protocolo con 30s IRR con la diferencia de 6 min 45 s menos de sesión.
- Se ha observado un fenómeno de potenciación post-activación (PAP) en muchos sujetos que contrarresta la influencia negativa de la fatiga durante la recuperación, minimizando así la pérdida de altura de salto en CMJ 4 min 15 s después de la configuración CL4 (1x30 IRR 15")

- El protocolo tradicional hasta el fallo produce un decremento significativo de la altura de salto, tras cada serie y al final de la sesión.
- El protocolo tradicional hasta el fallo produce un incremento significativo de la concentración de lactato en sangre.
- El protocolo de Cluster con 30 s IRR muestra la menor concentración de lactato tras el entrenamiento.
- El protocolo tradicional hasta el fallo ocasiona los niveles más altos de percepción subjetiva del esfuerzo.
- El protocolo de Cluster con 30 s IRR reporta los niveles más bajos de percepción subjetiva del esfuerzo
- El protocolo de las CL4 ha experimentado los mayores valores de percepción subjetiva de esfuerzo dentro de los protocolos de Cluster.

■ Estudio II:

- Es necesario expresar los resultados del ácido úrico en saliva sin corregir (mg/dL) los valores obtenidos para que se correlacione con los valores de este metabolito en sangre tras el entrenamiento de fuerza al fallo y no fallo.
- Tanto el uso de los Salivettes de Algodón y Fluido Pasivo para la extracción de saliva y posteriormente determinación del estrés metabólico a partir del ácido úrico, son válidos para determinar el estrés metabólico en saliva tras el entrenamiento de fuerza.
- El entrenamiento hasta el fallo (6x10) produce mayor concentración de ácido úrico en suero que el entrenamiento hasta el no fallo (6x5).
- Los valores máximos de ácido úrico en suero para ambos protocolos se reportaron al post 24horas.

- Los valores máximos de ácido úrico en saliva medidos en Salivette de algodón se reportaron para el protocolo hasta el fallo a las post28

Estudio III:

- • El entrenamiento de fuerza estudiado, (3 series de 5 repeticiones) en sentadilla y press de banca con la mitad del carácter del esfuerzo, experimentó significativamente valores más bajos de velocidad cuando se realizaban recuperaciones entre serie de 1 min, frente a los protocolos de 3 y 5 min.
- No se encontraron diferencias significativas en el rendimiento al evaluar la velocidad media de ejecución para los protocolos de 3 y 5 min de recuperación entre serie con la mitad del carácter del esfuerzo en sentadilla y press de banca.
- Los parámetros de la relación F-v no se ha visto afectados tras la sesión de entrenamiento en sentadilla y press de banca para ninguno de los protocolos estudiados.
- El entrenamiento de fuerza con la mitad de carácter del esfuerzo preserva la capacidad de v_0 durante una sesión de sentadilla y press de banca.

Estudio IV:

- El entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado en sentadillas con el 120% del RM ha reportado valores máximos de CK, AST y LDH para sangre y saliva a las 96 h post entrenamiento
- Los valores de marcadores de daño muscular en suero tras el entrenamiento de fuerza excéntrico acentuado genera una gran variabilidad entre sujetos.
- Existe un comportamiento diferente entre la respuesta de la CK, AST y LDH para suero y saliva.
- Se ha encontrado un bajo nivel de similitud entre los valores de los

marcadores de daño muscular estudiados para suero y saliva.

- Este entrenamiento produce un incremento significativo de la Creatina Kinasa en saliva para los hombres a las 96 h Post Entreno.

■ **Estudio V:**

- Entrenar hasta el fallo (6 series de 10 repeticiones) produce una disminución significativa de la velocidad de ejecución durante la quinta y sexta serie.
- La pérdida de velocidad entre series se propone como un método para cuantificar la fatiga mecánica producida durante los entrenamientos de fuerza hasta el fallo y no fallo.
- La activación voluntaria se ve afectada tras ambos protocolos de fuerza (fallo: 6x10 vs no fallo: 6x5) incluso 48 h después del entrenamiento.
- El protocolo hasta el fallo produce significativamente mayores niveles de fatiga periférica justo al acabar el entrenamiento que la configuración hasta el no fallo.
- Entrenar al fallo y no al fallo produce valores máximos de daño muscular y fatiga periférica al post 1h tras entrenamiento.
- El protocolo de fuerza hasta el fallo ocasiona mayores niveles de daño muscular en todos los tiempos medidos que el protocolo hasta el no fallo.

XIV

Aplicaciones prácticas

XVI/ APLICACIONES PRÁCTICAS**■ Estudio I:**

- Introducir tiempo de recuperación entre series es una estrategia válida para desarrollar un mejor rendimiento en cuanto a velocidad de ejecución en el entrenamiento de fuerza en sentadillas.
- No entrenar al fallo reduce significativamente la fatiga mecánica, metabólica y perceptual ocasionada.
- El protocolo Cluster con 15 s IRR se propone como un método eficaz para realizar entrenamientos de fuerza donde se persigue desarrollar velocidades de ejecución altas y poca fatiga acumulada con un tiempo de sesión de 18 min 15 s. Este tipo de entrenamiento es atractivo para periodos competitivos o en los que el deportista se encuentra en estado de plateau.
- El entrenamiento Cluster suscita que puede ser una alternativa para entrenar a sujetos poco experimentados ya que supone una menor percepción subjetiva del esfuerzo.
- El protocolo Cluster de una única serie de 30 repeticiones con 15 s IRR consigue contrarrestar la influencia negativa de la fatiga durante la recuperación, minimizando así la pérdida de altura de salto en CMJ 4 min 15 s después del entrenamiento, proponiendo a esta configuración de la serie como un método de PAP.

■ Estudio II:

- La utilización de la saliva para la determinación del estrés metabólico a partir del ácido úrico tras el entrenamiento de fuerza se presenta como una propuesta válida, barata, rápida e indolora. Lo que supone ventajas a la hora de conocer el efecto producido por el entrenamiento, frente al

método tradicional de evaluación a través del suero.

- Tanto Salivettes de algodón como flujo pasivo, son válidos para la recolección de saliva con el fin de determinar el estrés metabólico a partir de la concentración de ácido úrico.
- Para que el uso de la saliva sea fiable, se hace necesario utilizar los valores absolutos (mg/dL) sin necesidad de normalizar por flujo salival o proteína total.

■ Estudio III:

- Recuperaciones de 1 minuto no son suficientes para mantener el rendimiento en sentadilla y press de banca cuando se entrena con la mitad del carácter del esfuerzo.
- Al no encontrarse diferencias significativas en el rendimiento entre las recuperaciones de 3 y 5 minutos para un entrenamiento de fuerza en sentadillas y press de banca con la mitad del carácter del esfuerzo, se puede recomendar el uso de los 3 minutos para optimizar el rendimiento en la sesión de fuerza, ya que la duración es 6 minutos más corta.
- El entrenamiento de fuerza para sentadilla y press de banca con la mitad de carácter del esfuerzo se propone como una estrategia apropiada para preservar la capacidad de v_0 durante la sesión.

■ Estudio IV:

- La medición de marcadores de daño muscular en saliva tras el entrenamiento de fuerza no son fiables, por lo que se deben medir en suero.
- La alta variabilidad en las respuestas individuales de CK, AST y LDH en suero al protocolo de entrenamiento excéntrico acentuado que hemos de nuestra investigación, sugiere que los entrenadores no pueden extrapolar los resultados reportados en la literatura a sus atletas, siendo necesario un

control individual de estos biomarcadores.

- Si se persigue conocer el pico máximo de los valores de daño muscular tras un entrenamiento de estas características, se recomienda la medición en suero a las 96 h post entrenamiento.

■ **Estudio V:**

- Entrenar sin llegar al fallo permite un mejor rendimiento en cuanto a la velocidad de ejecución durante el entrenamiento de fuerza en sentadilla.
- Tener en cuenta el novedoso concepto de pérdida de velocidad entre series, nos aportará una visión más acertada del estado de recuperación del deportista entre cada serie.
- Se debe tener en cuenta que la activación voluntaria, relacionada con la fatiga central, se ve afectada tras el entrenamiento al fallo y no al fallo incluso a las 48 h post entrenamiento.
- Entrenar al fallo produce mayores niveles de fatiga periférica y de daño muscular que el entrenamiento hasta el no fallo.

XV

Limitaciones

XV/ LIMITACIONES

A pesar de ser un trabajo muy elaborado, siempre surgen diferentes limitaciones que podrían haber mejorado el diseño de nuestras investigaciones. A continuación, se enumeran algunas limitaciones que presenta esta tesis doctoral:

Únicamente un estudio, el Estudio 4, sobre entrenamiento excéntrico se realiza con muestra masculina y femenina. Por lo que la participación de la muestra femenina hubiera mejorado la calidad de nuestras investigaciones para aportar respuestas más globalizadas a la sociedad.

Para todos los estudios, las participantes han sido estudiantes de educación física, por lo que es osado pensar que los datos de esta tesis se pueden extrapolar a cualquier otro sector de la población.

Para el Estudio I, se propone como limitación del estudio que no se haya igualado el tiempo de recuperación entre cada protocolo.

En el Estudio III, acerca del tiempo de recuperación, ha sido una limitación el uso únicamente de variable mecánicas, a diferencia del resto de intervenciones propuestas en esta tesis doctoral.

En el Estudio IV, nos encontramos con la limitación de que en esta investigación sólo se utilizó un tipo de recolección de muestras de saliva (por flujo pasivo) y una forma de expresar el resultado. A diferencia del Estudio II, donde estudiamos dos métodos de recolección y tres propuestas para expresar el resultado del ácido úrico.

También en el Estudio IV, al comprobar la dinámica seguida por la respuesta de la CK en saliva, hubiera sido interesante medir en tiempos posteriores, de esta forma tendríamos con mayor exactitud el comportamiento de los marcadores de daño muscular en saliva.

No se han medido exactamente los mismos ejercicios ni las mismas variables a lo largo de los diferentes estudios, para muchos esto puede ser una limitación, pero nosotros lo hemos contemplado como una estrategia con el fin de aportar una mayor variedad de resultados.

Otra limitación que presenta el Estudio IV, es el tamaño de la muestra, ya que la variabilidad de los resultados es muy grande. Para obtener un poder estadístico adecuado, sería necesario una muestra mínima de 15 sujetos por sexo. Es por ello por lo que se entiende a esta investigación como un estudio piloto.

La principal limitación que sufre el Estudio V es que el volumen no está igualado entre los dos protocolos. Aunque hacemos un análisis complementario durante el entrenamiento y se comprueba que la fatiga periférica es mayor cuando el volumen está igualado (30 repeticiones) la respuesta post entrenamiento, únicamente nos permite comparar el efecto de estos dos protocolos con volúmenes distintos.

XVI

Futuras líneas de investigación

XVI/ FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta tesis doctoral profundiza sobre una brecha existente en la literatura creando conocimiento, y por consiguiente permite la ampliación de esta línea de investigación dando pie a futuros estudios que pueden estar relacionados.

Se debería explorar el efecto de introducir períodos de descanso después de grupos de dos o tres repeticiones continuas, no sólo entre repeticiones.

Otra propuesta en relación con los protocolos Cluster/ IRR es la de estudiar la respuesta habiendo igualado el tiempo de recuperación.

En estudios posteriores se debería evaluar la influencia de diferentes configuraciones de las series en el equilibrio PAP/fatiga con diferentes recuperaciones para un mejor diseño de sesiones de entrenamiento.

Además, es susceptible de estudiar el efecto de la duración del descanso entre series sobre el rendimiento mecánico utilizando otros ejercicios (p. Ej., Press de piernas o dominadas), caracteres del esfuerzo (es decir, proximidad al fracaso), otras cargas (p. Ej., 20RM y 5RM), y poblaciones (p. ej., mujeres o atletas altamente entrenados). Por ejemplo, aunque el protocolo Rec 3' proporcionó resultados satisfactorios en el presente estudio, es posible que se necesiten períodos de descanso entre series más largos para mantener el rendimiento mecánico al levantar cargas más pesadas o al realizar series más cercanas al fallo.

También sería interesante comparar las mediciones de suero y saliva con las extracciones de biopsia (método Gold Standard en evaluación del daño muscular) para determinar cuál de los dos métodos (suero y saliva) proporciona una mejor representación del daño muscular inducido por el ejercicio físico. Además, los estudios que involucran puntos de tiempo más largos habrían sido aconsejables para evaluar si existe una mayor correlación entre las mediciones de saliva y suero después del daño muscular en esos puntos temporales.

Por otro lado, otros estudios deberían evaluar si la manipulación del volumen de entrenamiento puede afectar la respuesta tardía de los indicadores de fatiga central y periférica tras el entrenamiento al fallo y no fallo.

Sería atractivo, estudiar la respuesta de diferentes biomarcadores como hormonas, o citoquinas tras las configuraciones de las series que hemos propuesto en estas intervenciones.

Por último, el estudio de los efectos crónicos de las propuestas agudas expuestas en esta tesis es de gran interés para comprender las adaptaciones que se puede conseguir.

XVII

Referencias

XVII/ REFERENCIAS

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002). Increase rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *Article in Journal of Applied Physiology*, 93(4), 1318-1326.
- Aagaard, Per, Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A.-M., Wagner, A., Magnusson, S. P., ... Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *The Journal of Physiology*, 534(2), 613–623.
- Abdessemed, D., Duche, P., Hautier, C., Poumarat, G., & Bedu, M. (1999). Effect of recovery duration on muscular power and blood lactate during the bench press exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 20(6), 368–373.
- Adams, K., Cafarelli, E., Gary, A., Dooly, C., Matthew, S., Fleck, S. J., ... Triplett-mcbride, T. (2002). Progression Models in Resistance Training for Healthy Adults. *Medicine & Science in Sport Excercise*, 34(2), 364–380.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2003). Acute hormonal and neuromuscular responses and recovery to forced vs. Maximum repetitions multiple resistance exercises. *International Journal of Sports Medicine*, 24(6), 410–418.
- Ahtiainen, J., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W., & Häkkinen, K. (2005). *Short vs. long rest period between the sets in hypertrophic resistance training: influence on muscle strength, size, and hormonal adaptations in trained men.* , 19(3), 572–582.
- Ahtiainen, Juha P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Häkkinen, K. (2003). Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men. *European*

Journal of Applied Physiology, 89(6), 555–563.

Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal Muscle Fatigue : Cellular Mechanisms. *American Physiological Society*, 88(1), 287–332.

Allen, D. G., & Westerblad, H. (2001). Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue. *Journal of Physiology*, 536(3), 657–665.

Alway, S. E., Grumbt, W. H., Stray-Gundersen, J., & Gonyea, W. J. (1992). Effects of resistance training on elbow flexors of highly competitive bodybuilders. *Journal of Applied Physiology*, 72(4), 1512–1521.

Ament, W., & Verkerke, G. (2009). Exercise and fatigue. *Sports Medicine*, 39(5), 389–422.

Ammar, A., Riemann, B. L., Trabelsi, K., Blaumann, M., Abdelkarim, O., Chtourou, H., ... Hökelmann, A. (2019). Comparison of 2- and 3-Minute Inter-Repetition Rest Periods on Maximal Jerk Technique and Power Maintenance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 90(3), 287–296.

Arana, C., Cutando, A., Ferrera, M., Gómez-Moreno, G., Worf, C., Bolaños, M., ... Acuña-Castroviejo, D. (2006). Parameters of oxidative stress in saliva from diabetic and parenteral drug addict patients. *J Oral Pathol Med*, 35(9), 554-559.

Arnason, A., Andersen, T. E., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2007). Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(1), 40–48.

Askling, C., Karlsson, J., & Thorstensson, A. (2003). Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 13(4), 244–250.

Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Medicine*,

26(4), 217–238.

- Aughey, R. J., Murphy, K. T., Clark, S. A., Garnham, A. P., Snow, R. J., Cameron-Smith, D., ... Mckenna, M. J. (2007). Muscle Na-K-ATPase activity and isoform adaptations to intense interval exercise and training in well-trained athletes. *J Appl Physiol*, 103(1), 39–47.
- Bahar, G., Feinmesser, R., Shpitzer, T., Popovtzer, A., & Nagler, R. M. (2007). Salivary analysis in oral cancer patients. *Cancer*, 109(1), 54–59.
- Balsalobre-Fernandez, C., Glaister, M., & Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15), 1574–1579.
- Balsalobre Fernández, C., García Ramos, A., & Jiménez Reyes, P. (2018). Load-velocity profiling in the military press exercise: Effects of gender and training. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 13(5), 743–750.
- Balsalobre Fernández, C., & Jimenez Reyes, P. (2014). *Entrenamiento de fuerza. Nuevas perspectivas metodológicas* (ibooks). Madrid, España: ibooks.
- Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maden-Wilkinson, T. M., Tillin, N. A., & Folland, J. P. (2016). Training-specific functional, neural, and hypertrophic adaptations to explosive-vs. sustained-contraction strength training. *Journal of Applied Physiology*, 120(11), 1364–1373.
- Barranco, T., Tvarijonaviciute, A., Tecles, F., Sanchez-Resalt, C., Jimenez-Reyes, P., Rubio, M., ... Cugat, R. (2017). Changes in CK, LDH and AST in saliva samples after an intense exercise: a pilot study. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 58(6), 910–916.
- Battino, M., Ferreiro, M. S., Gallardo, I., Newman, H. N., & Bullon, P. (2002). The antioxidant capacity of saliva. *Journal of Clinical Periodontology*, 29(3), 189–194.

- Baz-Valle, E., Fontes-Villalba, M., Santos-Concejero, J., Maela', M., & Fontes-Villalba, M. (2018). Total number of sets as a training volume quantification method for muscle hypertrophy: a systematic review. *Article in The Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Beaven, C. M., Gill, N. D., & Cook, C. J. (2008). Salivary testosterone and cortisol responses in professional rugby players after four resistance exercise protocols. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(2), 426–432.
- Behm, D., Drinkwater, E., Behm, D. G., Reardon, G., & Fitzgerald, J. (2002). The effect of 5, 10, and 20 repetition maximums on the recovery of voluntary and evoked contractile properties. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 16(2), 209–218.
- Berger, R. A. (1962a). Effect of varied weight training programs on strength. *Research Quarterly of the American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 33(2), 168–181.
- Berger, R. A. (1962b). Optimum repetitions for the development of strength. *Research Quarterly of the American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 33(3), 334–338.
- Bibi, G., & Nagler, R. (2008). Compositional and oxidative analysis in the saliva and serum of predialysis chronic kidney disease patients and end-stage renal failure patients on peritoneal dialysis. *Ther Apher Dial*, 12(2), 164–170.
- Blain, G. M., & Hureau, T. J. (2017). Limitation of fatigue and performance during exercise: the brain-muscle interaction. *Experimental Physiology*, 102(1), 3–4.
- Boccia, G., Dardanello, D., Zoppiroli, C., Bortolan, L., Cescon, C., Schneebeli, A., ... Pellegrini, B. (2017). Central and peripheral fatigue in knee and elbow extensor muscles after a long-distance cross-country ski race. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(9), 945–955.

- Boccia, Gennaro, Dardanello, D., Tarperi, C., Festa, L., La Torre, A., Pellegrini, B., ... Rainoldi, A. (2018). Women show similar central and peripheral fatigue to men after half-marathon*. *European Journal of Sport Science*, 18(5), 695–704.
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H., & Lakomy, H. K. A. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *Journal of Applied Physiology*, 80(3), 876–884.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2(2), 92–98.
- Bosco, C., Luhtanen, P., & Komi, P. V. (1983). A Simple Method for Measurement of Mechanical Power in Jumping. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* (Vol. 50).
- Boullosa, D., Abreu, L., Beltrame, L. G., & Behm, D. G. (2013). The acute effect of different half squat set configurations on jump potentiation. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(8), 2059–2066.
- Bourne, M. N., Timmins, R. G., Opar, D. A., Pizzari, T., Ruddy, J. D., Sims, C., ... Shield, A. J. (2018). An evidence-based framework for strengthening exercises to prevent hamstring Injury. *Sports Medicine*, 48(2), 251–267.
- Brancaccio, P, Limongelli, F. M., & Maffulli, N. (2006). Monitoring of serum enzymes in sport. *British Journal of Sports Medicine*, 40(2), 96–97.
- Brancaccio, Paola, Lippi, G., & Maffulli, N. (2010). Biochemical markers of muscular damage. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 48(6), 757–767.
- Brancaccio, Paola, Maffulli, N., & Limongelli, F. M. (2007). Creatine kinase monitoring in sport medicine. *British Medical Bulletin*, 81, 209–230.
- Brandenburg, J., Docherty, D., & Brandenburg, J. P. (2002). The effects of accentuated eccentric loading on strength, muscle hypertrophy, and neural adaptations in

- trained individuals. *National Strength & Conditioning Association J. Strength Cond. Res*, 16(1), 25–32.
- Brandon, R., Howatson, G., Strachan, F., & Hunter, A. M. (2015). Neuromuscular response differences to power vs strength back squat exercise in elite athletes. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(5), 630–639.
- Brooks, G. A. (2001, October 1). Lactate doesn't necessarily cause fatigue: Why are we surprised? *Journal of Physiology*. Wiley-Blackwell.
- Brooks, George A. (2007). Lactate: Link between glycolytic and oxidative metabolism. *Sports Medicine*, 37(4–5), 341–343.
- Brooks, N., Layne, J. E., Gordon, P. L., Roubenoff, R., Nelson, M. E., & Castaneda-Sceppa, C. (2007). Strength training improves muscle quality and insulin sensitivity in Hispanic older adults with type 2 diabetes. *International Journal of Medical Sciences*, 4(1), 19–27.
- Brughelli, M., Cronin, J., Mendiguchia, J., Kinsella, D., & Nosaka, K. (2010). Contralateral leg deficits in kinetic and kinematic variables during running in australian rules football players with previous hamstring injuries. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(9), 2539–2544.
- Brzycki, M. (1993). Strength testing—predicting a one-rep max from reps-to-fatigue. *Journal of Physical Education, Recreation and Dance*, 64(1), 88–90.
- Burd, N. A., Andrews, R. J., West, D. W. D., Little, J. P., Cochran, A. J. R., Hector, A. J., ... Phillips, S. M. (2012). Muscle time under tension during resistance exercise stimulates differential muscle protein sub-fractional synthetic responses in men. *The Journal of Physiology*, 590(2), 351–362.
- Byrne, C., Twist, C., & Eston, R. (2004). Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. *Sports Medicine*, 34(1), 49–69.

- Cady, E. B., Elshove, H., Jones, D. A., & Moll, A. (1989). The metabolic causes of slow relaxation in fatigued human skeletal muscle. *The Journal of Physiology*, 418(1), 327–337.
- Cairns, S. P., Knicker, A. J., Thompson, M. W., & Sjogaard, G. (2005). Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exercise Sport Science Rev*, 33(1), 9–16.
- Calle, M. C., & Fernandez, M. L. (2010). Effects of resistance training on the inflammatory response. *Nutrition Research and Practice*, 4(4), 259–269.
- Carroll, T. J., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2016). Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *Journal of Applied Physiology*, 122(5), 1068–1076.
- Celec, P., & Ostatníková, D. (2012). Saliva collection devices affect sex steroid concentrations. *Clinica Chimica Acta*, 413(19–20), 1625–1628.
- Chaabene, H., Prieske, O., Negra, Y., & Granacher, U. (2018). Change of Direction Speed: Toward a Strength Training Approach with Accentuated Eccentric Muscle Actions. *Sports Medicine*, 48(8), 1773–1779.
- Chapman, D., Newton, M., Sacco, P., & Nosaka, K. (2006). Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 27(8), 591–598.
- Chen, T. C., Yang, T.-J., Huang, M.-J., Wang, H.-S., Tseng, K.-W., Chen, H.-L., & Nosaka, K. (2019). Damage and the Repeated Bout Effect of Arm, Leg and Trunk Muscles Induced by Eccentric Resistance Exercises. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 0–1.
- Chicharro, J. L., & Mojares, L. M. L. (2008). *Fisiología Clínica del Ejercicio* (Ed. Médica).
- Chielle, E. O., Casarin, J. N., Chielle, E. O., & Casarin, J. N. (2017). Evaluation of

- salivary oxidative parameters in overweight and obese young adults. *Archives of Endocrinology and Metabolism*, 61(2), 152–159.
- Chin, E. R., & Allen, D. G. (1998). The contribution of pH-dependent mechanisms to fatigue at different intensities in mammalian single muscle fibres. *Journal of Physiology*, 512(3), 831–840.
- Christou, M., Smilios, I., Sotiropoulos, K., Volaklis, K., Pilianidis, T., & Tokmakidis, S. P. (2006). The Effects of resistance training on the physical capacities of adolescent soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 783–791.
- Clarkson, P. M., & Hubal, M. J. (2002). Exercise-induced muscle damage in humans. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation / Association of Academic Physiatrists*, 81(11 Suppl), 52–69.
- Clarkson, P. M., Kearns, A. M. Y. K., Rouzier, P., Rubin, R., & Thompson, P. D. (2006). Serum Creatine Kinase Levels and Renal Function Measures in Exertional Muscle Damage. *Medicine & Science in Sport Exercise*.
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., ... Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4), 397–402.
- Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The Molecular Bases of Training Adaptation. *Sport Medicine*, 37(9), 737–763.
- Cohen, J. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Academic press.
- Conceição, F., Fernandes, J., Lewis, M., González-Badillo, J. J., & Jiménez-Reyes, P. (2016). Movement velocity as a measure of exercise intensity in three lower limb exercises. *Journal of Sports Sciences*, 34(12), 1099–1106.

- Contreras-Aguilar, M. D., Escribano, D., Martínez-Subiela, S., Martínez-Miró, S., Rubio, M., Tvarijonaviciute, A., ... Cerón, J. J. (2017). Influence of the way of reporting alpha-Amylase values in saliva in different naturalistic situations: A pilot study. *PLOS ONE*, *12*(6), e0180100.
- Cook, C. J., Beaven, C. M., & Kilduff, L. P. (2013). Three weeks of eccentric training combined with overspeed exercises enhances power and running speed performance gains in trained athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *27*(5), 1280–1286.
- Cotterman, M. L., Darby, L. A., & Skelly, W. A. (2005). Comparison of muscle force production using the smith machine and free weights for bench press and squat exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *19*(1), 169–176.
- Courel-Ibáñez, J., Martínez-Cava, A., Morán-Navarro, R., Escribano-Peñas, P., Chavarren-Cabrero, J., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Reproducibility and repeatability of five different technologies for bar velocity measurement in resistance training. *Annals of Biomedical Engineering*, *47*(7), 1523–1538.
- Crewther, B., Keogh, J., Cronin, J., & Cook, C. (2006). Possible Stimuli for Strength and Power Adaptation. *Sports Medicine*, *36*(3), 215–238.
- Cronin, J., & Sleivert, G. (2005). Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance. *Sports Medicine*, *35*(3), 213–234.
- Dankel, S. J., Mattocks, K. T., Jessee, M. B., Buckner, S. L., Mouser, J. G., Counts, B. R., ... Loenneke, J. P. (2017). Frequency: the overlooked resistance training variable for inducing muscle hypertrophy? *Sports Medicine*, *47*(5), 799–805.
- Davies, T. B., Halaki, M., Orr, R., Helms, E. R., & Hackett, D. A. (2019). Changes in bench press velocity and power after 8 weeks of high-load cluster- or traditional- set structures, *Journal of Strength and Conditioning Research*,(28).

- Davies, T., Orr, R., Halaki, M., & Hackett, D. (2016). Effect of training leading to repetition failure on muscular strength: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46(4), 487–502.
- Davis, J., & Bailey, S. (1997). Possible mechanisms of central nervous system fatigue during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20(1), 45–57.
- de Hoyo, Moises, Gonzalo-Skok, O., Sañudo, B., Carrascal, C., Plaza-Armas, J. R., Camacho-Candil, F., & Otero-Esquina, C. (2016). Comparative effects of in-season full-back squat, resisted sprint training, and plyometric training on explosive performance in U-19 elite soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(2), 368–377.
- de Hoyo, Moisés, Sañudo, B., Carrasco, L., Mateo-Cortes, J., Domínguez-Cobo, S., Fernandes, O., ... Gonzalo-Skok, O. (2016). Effects of 10-week eccentric overload training on kinetic parameters during change of direction in football players. *Journal of Sports Sciences*, 34(14), 1380–1387.
- Del Vecchio, A., Negro, F., Falla, D., Bazzucchi, I., Farina, D., & Felici, F. (2018). Higher muscle fiber conduction velocity and early rate of torque development in chronically strength-trained individuals. *Journal of Applied Physiology*, 125(4), 1218–1226.
- Del Vecchio, Alessandro, Casolo, A., Negro, F., Scorcelletti, M., Bazzucchi, I., Enoka, R., ... Farina, D. (2019). The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. *The Journal of Physiology*, 597(7), 1873–1887.
- Dello Iacono, A., 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).
- Delorme, T. L. (1945). Restoration of muscle power by heavy-resistance exercise. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 27(4), 645–667.

- DeLorme, T., Schwab, R., & Watkins, A. (1948). The response of the quadriceps femoris to progressive-resistance exercises in poliomyelitic patients. *JBJS*, 30(4), 834–847.
- DeLorme, T., & Watkins, A. (1948). Technics of progressive resistance exercise. *Rehabil, Arch Phys Med*, 29, 263–273.
- Deminice, R., Sicchieri, T., Payao, P. o., & Jordao, A. A. (2010). Blood and salivary oxidative stress biomarkers following an acute session of resistance exercise in humans. *Int J Sports Med Int J Sports Med*, 31(31), 599–603.
- Denton, J. (2005). *The kinematic, kinetic and blood lactate profiles of continuous and intra-set rest loading schemes*. Auckland University of Technology.
- DeWeese, B. H., Hornsby, G., Stone, M., & Stone, M. H. (2015, December 1). The training process: Planning for strength-power training in track and field. Part 1: Theoretical aspects. *Journal of Sport and Health Science*. Elsevier B.V.
- Dolezal, B. A., Potteiger, J. A., Jacobsen, D. J., Benedict, S. H., Dolezal, B. A., Potteiger, J. A., ... Benedict, S. H. (2000). Muscle damage and resting metabolic rate after acute resistance exercise with an eccentric overload. *Med. Sci. Sports Exerc*, 31(5), 1202–1207.
- Dos'Santos, T., Thomas, C., Comfort, P., McMahon, J. J., Jones, P. A., Oakley, N. P., & Young, A. L. (2017). Between-session reliability of isometric mid-thigh pull kinetics and maximal power clean performance in male youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(12), 3356–3372.
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & MC Guigan, M. (2018). Effects of accentuated eccentric loading on muscle properties, strength, power, and speed in resistance-trained rugby players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(10), 2750–2761.
- Draganidis, D., Chatzinikolaou, A., Jamurtas, A. Z., Carlos Barbero, J., Tsoukas, D.,

- Theodorou, A. S., ... Fatouros, I. (2013). The time-frame of acute resistance exercise effects on football skill performance: The impact of exercise intensity. *Journal of Sports Sciences*, 31(7), 714–722.
- Drinkwater, E. J., Lawton, T. W., Lindsell, R. P., Pyne, D. B., Hunt, P. H., & McKenna, M. J. (2005). Training leading to repetition failure enhances bench press strength gains in elite junior athletes. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(2), 382–388.
- Dudley, G. A., & Djamil, R. (1985). Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise. *Journal of Applied Physiology*, 59(5), 1446–1451.
- Enoka, R M. (1996). Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81(6), 2339–2346.
- Enoka, Roger M. (1996). Eccentric contractions require unique activation strategies by the nervous system. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81(6), 2339–2346.
- Enoka, Roger M. (2002). Activation order of motor axons in electrically evoked contractions. *Muscle & Nerve*, 25(6), 763–764.
- Enoka, Roger M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, 586(1), 11–23.
- Escamilla, R. F. (2001). Squat Exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(1), 127–141.
- Faigenbaum, A. D., & Myer, G. D. (2010). Resistance training among young athletes: Safety, efficacy and injury prevention effects. *British Journal of Sports Medicine*, 44(1), 56–63.
- Falls, W. (2003). Effects of different set configurations on barbell. *Strength And*

Conditioning, 17(1), 95–103.

- Fernandez-Gonzalo, R., Lundberg, T. R., Alvarez-Alvarez, L., & de Paz, J. A. (2014). Muscle damage responses and adaptations to eccentric-overload resistance exercise in men and women. *European Journal of Applied Physiology*, 114(5), 1075–1084.
- Fisher, J. P., Blossom, D., & Steele, J. (2015). A comparison of volume-equated knee extensions to failure, or not to failure, upon rating of perceived exertion and strength adaptations. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*, 41(2), 168–174.
- 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). The adaptations to strength training: Morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Medicine*, 37(2), 145–168.
- Fonseca, F. S., Costa, B. D. de V., Ferreira, M. E. C., Paes, S., de Lima-Junior, D., Kassiano, W., ... Fortes, L. S. (2020). Acute effects of equated volume-load resistance training leading to muscular failure versus non-failure on neuromuscular performance. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 1(17).
- Foo, J. Y. Y., Wan, Y., Kostner, K., Arivalagan, A., Atherton, J., Cooper-White, J., ... Punyadeera, C. (2012). NT-ProBNP Levels in Saliva and Its Clinical Relevance to Heart Failure. *PLoS ONE*, 7(10), e48452.
- Freitas, T. T., Martinez-Rodriguez, A., Calleja-González, J., & Alcaraz, P. E. (2017). Short-term adaptations following complex training in team-sports: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 12(6).
- Friden, J., & Lieber, R. L. (2001). Eccentric exercise-induced injuries to contractile

and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(3), 321–326.

Gabbett, T. J. (2016). The training-injury prevention paradox: Should athletes be training smarter and harder? *British Journal of Sports Medicine*, 50(5), 273–280.

Gabriel, D. A., Kamen, G., & Frost, G. (2006). Neural adaptations to resistive exercise: Mechanisms and recommendations for training practices. *Sports Medicine*, 36(2), 133–149.

Galiano, C., Rocha, L., Blanco, F. P., Hidalgo De Mora, J., & Sáez De Villarreal, E. (2020). Low-velocity loss induces similar strength gains to moderate-velocity loss during resistance training. *Article in The Journal of Strength and Conditioning Research*.

Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725–1789.

García-Ramos, A., Torrejón, A., Feriche, B., Morales-Artacho, A. J., Pérez-Castilla, A., Padial, P., & Jaric, S. (2018). Selective effects of different fatigue protocols on the function of upper body muscles assessed through the force–velocity relationship. *European Journal of Applied Physiology*, 118(2), 439–447.

García Ramos, A., González-Hernández, J. M., Baños Pelegrín, E., Castaño Zambudio, A., Capelo Ramírez, F., Boullosa, D., ... Jiménez Reyes, P. (2020). Mechanical and metabolic responses to traditional and cluster set configurations in the bench press exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(3), 663–670.

García Ramos, A., Haff, G. G., Feriche, B., & Jaric, S. (2017). Effects of different conditioning programs on the performance of high-velocity soccer-related tasks: Systematic review and meta-analysis of controlled trials. *International Journal of Sport Science & Coaching*, 13(1), 129–151.

- 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., 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. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 29(9), 2388–2396.
- García Ramos, A., Pestaña Melero, F. L., Pérez Castilla, A., Rojas, F. J., & Gregory Haff, G. (2018). Mean velocity vs. mean propulsive velocity vs. peak velocity. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1273–1279.
- García Ramos, A., Suzovic, D., & Pérez Castilla, A. (2019). The load-velocity profiles of three upper-body pushing exercises in men and women. *Sports Biomechanics*.
- García Ramos, A., Torrejón, A., Feriche, B., Morales Artacho, A. J., Pérez Castilla, A., Padial, P., & Haff, G. G. (2018). Prediction of the maximum number of repetitions and repetitions in reserve from barbell velocity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(3), 353–359.
- García Ramos, A., Pérez Castilla, A., & Jaric, S. (2018). Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps. *Sports Biomechanics*.
- García Ramos, A., Amador, & Jaric, S. (2018). Two-point method: A quick and fatigue-free procedure for assessment of muscle mechanical capacities and the 1 repetition maximum. *Strength and Conditioning Journal*, 40(2), 54–66.
- García Ramos, A., Amador, & Jaric, S. (2019). Optimization of the force-velocity relationship obtained from the bench press throw exercise: An a-posteriori

- multicentre reliability study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(3), 317–322.
- Giandolini, M., Horvais, N., Rossi, J., Millet, G. Y., Morin, J. B., & Samozino, P. (2016). Acute and delayed peripheral and central neuromuscular alterations induced by a short and intense downhill trail run. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(11), 1321–1333.
- Gibala, M. J., Interisano, S. A., Tarnopolsky, M. A., Roy, B. D., MacDonald, J. R., Yarasheski, K. E., & MacDougall, J. D. (2000). Myofibrillar disruption following acute concentric and eccentric resistance exercise in strength-trained men. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 78(8), 656–661.
- Gibala, M. J., MacDougall, J. D., Tarnopolsky, M. A., Stauber, W. T., & Elorriaga, A. (1995). Changes in human skeletal muscle ultrastructure and force production after acute resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 78(2), 702–708.
- 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(November 2014), 151–159.
- Goldspink, G., Scutt, A., Loughna, P. T., Wells, D. J., Jaenicke, T., & Gerlach, G. F. (1992). Gene expression in skeletal muscle in response to stretch and force generation. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 262(3), 356–363.
- González-Badillo, J., Yañez-García, J., 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, Juan J, Marques, M. C., & Sánchez-Medina, L. (2011). The importance of movement velocity as a measure to control resistance training intensity. *Journal of Human Kinetics*, 29(A), 15–19.

- González-Badillo, Juan José, Gorostiaga, E. M., Arellano, R., & Izquierdo, M. (2005). Moderate Resistance Training Volume Produces More Favorable Strength Gains Than High Or Low Volumes During A Short- Term Training Cycle. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 19(3), 689–697.
- González-izal, M., Malanda, A., Gorostiaga, E., & Izquierdo, M. (2012). Electromyographic models to assess muscle fatigue. *Journal of Electromyography and Kinesiology*.
- Gonzalez Badillo, J. J., Manuel, Y.-G. J., Mora Custodio, R., & Rodríguez rosell, D. (2017). Velocity loss as a Variable for Mornitoring Resistance *Exercise*. *International Journal of Sports Medicine*, 38(3), 217–225.
- 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*, 18(8), 772–781.
- Gonzalez Badillo, J. J., Rodriguez Rosell, D., Sanchez Medina, L., Ribas, J., Lopez Lopez, C., Mora Custodio, R., ... 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., & Sanchez Medina, L. (2010). Movement Velocity as a Measure of Loading Intensity in Resistance Training. *International Journal Sport Medicine*, 31(05), 347–352.
- González Badillo, J. J., & Serna, J. R. (2002). *Bases de la programación del entrenamiento de fuerza* (Inde). Barcelona: Inde.
- Gonzalez, D., Marquina, R., Rondon, N., Rodriguez-Malaver, A., & Reyes, R. (2008). Effects of Aerobic Exercise on Uric Acid, Total Antioxidant Activity, Oxidative Stress, and Nitric Oxide in Human Saliva. *Research in Sports Medicine*, 16(2), 128–137.

- González Hernández, J., García Ramos, A., Capelo Ramírez, F., Castaño Zambudio, A., Marquez, G., Boullosa, D., & Jiménez-Reyes, P. (2017). Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Gonzalo-Skok, O., Sánchez-Sabaté, J., Izquierdo-Lupón, L., & Sáez de Villarreal, E. (2019). Influence of force-vector and force application plyometric training in young elite basketball players. *European Journal of Sport Science*, 19(3), 305–314.
- Gorostiaga, E. M., Amezcua-Navarro, I., Calbet, J. A. L., Sanchez-Medina, L., Cusso, R., Guerrero, M., ... Izquierdo, M. (2014). Blood Ammonia and lactate as Markers of Muscle Metabolites during legs press exercise. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(10), 2775–2785.
- Gorostiaga, E. M., Navarro-Amézqueta, I., Calbet, J. A. L., Hellsten, Y., Cusso, R., Guerrero, M., ... Izquierdo, M. (2012). Energy Metabolism during Repeated Sets of Leg Press Exercise Leading to Failure or Not. *PLoS ONE*, 7(7), e40621.
- Grgic, J., Lazinica, B., Mikulic, P., Krieger, J. W., & Schoenfeld, B. J. (2017). The effects of short versus long inter-set rest intervals in resistance training on measures of muscle hypertrophy: A systematic review. *Eur J Sport Sci*, 17(8), 983–993.
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Davies, T. B., Lazinica, B., Krieger, J. W., & Pedisic, Z. (2018a). Effect of resistance training frequency on gains in muscular strength: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(5), 1207–1220.
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Davies, T. B., Lazinica, B., Krieger, J. W., & Pedisic, Z. (2018b). Effect of Resistance Training Frequency on Gains in Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 48(5), 1207–1220.
- Griffiths, B., Grant, J., Langdown, L., Gentil, P., Fisher, J., & Steele, J. (2019). The effect of in-season traditional and explosive resistance training programs on strength, jump height, and speed in recreational soccer players. *Research*

Quarterly for Exercise and Sport, 90(1), 95–102.

- Gruber, M., & Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *European Journal of Applied Physiology*, 92(1–2), 98–105.
- Guentsch, A., Preshaw, P. M., Bremer-Streck, S., Klinger, G., Glockmann, E., & Sigusch, B. W. (2008). Lipid peroxidation and antioxidant activity in saliva of periodontitis patients: effect of smoking and periodontal treatment. *Clinical Oral Investigations*, 12(4), 345–352.
- Gyurászová, M., Gurecká, R., & ... J. B. (2020). Oxidative Stress in the Pathophysiology of Kidney Disease: Implications for Noninvasive Monitoring and Identification of Biomarkers. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/omcl/2020/5478708/>
- Hackett, D., & Cobley, S. (2018). Estimation of repetitions to failure for monitoring resistance exercise intensity: Building a case for application. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(5), 1352–1359.
- Haekel, R., & Häneke, P. (1996). Application of saliva for drug monitoring. An in vivo model for transmembrane transport. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine*, 34(3), 171–192.
- Haff, G. G., & Stone, M. H. (2003). Effects of different set configurations on barbell velocity and displacement during a clean. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 17(1), 95–103.
- Haff, G., Hobbs, R. T., Haff, E. E., Sands, W. a, Pierce, K. C., & Stone, M. H. (2008). Cluster training: a novel method for introducing training program variation. *Strength and Conditioning Journal*, 30(1), 67–76.
- Hakkinen, K., Pakarinen, A., Alen, M., Kauhanen, H., & Komi, P. V. (1988). Neuromuscular and hormonal adaptations in athletes to strength training in

- two years. *Journal of Applied Physiology*, 65(6), 2406–2412.
- Hall, M. M., Rajasekaran, S., Thomsen, T. W., & Peterson, A. R. (2016). Lactate: friend or foe. *PM&R*, 8(3), 8–15.
- 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.
- Hansen, K. T., Cronin, J. B., Pickering, S. L., & Newton, M. J. (2011). Does cluster loading enhance lower body power development in preseason preparation of elite rugby union players? *Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(8), 2118–2126.
- Haouzi, P., Hill, J. M., Lewis, B. K., & Kaufman, M. P. (1999). Responses of group III and IV muscle afferents to distension of the peripheral vascular bed. *Journal of Applied Physiology*, 87(2), 545–553.
- Hardee, J. P., Lawrence, M. M., Utter, A. C., Triplett, N. T., Zwetsloot, K. A., & McBride, J. M. (2012). Effect of inter-repetition rest on ratings of perceived exertion during multiple sets of the power clean. *European Journal of Applied Physiology*, 112(8), 3141–3147.
- Hardee, J. P., Lawrence, M. M., Zwetsloot, K. a, Triplett, N. T., Utter, A. C., & McBride, J. M. (2012). Effect of cluster set configurations on power clean technique. *Journal of Sports Sciences*, 26(4), 883–889.
- 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. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(4), 883–889.
- Harridge, S. D. R., Bottinelli, R., Canepari, M., Pellegrino, M. A., Reggiani, C., Esbjörnsson, M., & Saltin, B. (1996). Whole-muscle and single-fibre contractile properties and myosin heavy chain isoforms in humans. *Pflugers Archiv*

European Journal of Physiology, 432(5), 913–920.

- Hartmann, U., & Mester, J. (2000). Training and overtraining markers in selected sport events. *Medicine & Science in Sport Exercise*, 32(1), 209–215.
- Hayes, L. D., Bickerstaff, G. F., & Baker, J. S. (2010). Interactions of cortisol, testosterone, and resistance training: influence of circadian rhythms. *Chronobiology International*, 27(4), 675–705.
- Hayes, L. D., Sculthorpe, N., & Baker, J. S. (2015). Poor levels of agreement between serum and saliva testosterone measurement following exercise training in aging men. *The Aging Male*, 18(2), 67–70.
- Hayes, S. G., Mccord, J. L., Koba, S., & Kaufman, M. P. (2009). Gadolinium inhibits group III but not group IV muscle afferent responses to dynamic exercise. *Journal of Physiology*, 587(4), 873–882.
- Hellsten, Y., & Norman, B. (1993). Decreased resting levels of adenine nucleotides in human skeletal muscle after high-intensity training. *Article in Journal of Applied Physiology*, 74(5), 2523–2528.
- Helms, E. R., Storey, A., Cross, M. R., Brown, S. R., Lenetsky, S., Ramsay, H., ... Zourdos, M. C. (2017). RPE and velocity relationships for the back squat, bench press, and deadlift in powerlifters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(2), 292–297.
- Henneman, E. (1957). Relation between Size of Neurons and Their Susceptibility to Discharge. *Science*, 126(3287), 1345–1347.
- Hill, C. A., Thompson, M. W., Ruell, P. A., Thom, J. M., & White, M. J. (2001). Sarcoplasmic reticulum function and muscle contractile character following fatiguing exercise in humans. *Journal of Physiology*, 531(3), 871–878.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive

statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), 3–13.

Hortobágyi, T., & Denahan, T. (1989). Variability in Creatine Kinase: Methodological, Exercise, and Clinically Related Factors. *International Journal of Sports Medicine*, 10(02), 69–80.

Hortobágyi, Tibor, Barrier, J., Beard, D., Braspeninx, J., Koens, P., Devita, P., ... Lambert, J. (1996). Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *Journal of Applied Physiology*, 81(4), 1677–1682.

Howatson, G., Brandon, R., & Hunter, A. M. (2015). The response to, and recovery from maximum strength and power training in elite track and field athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11, 356–362.

Hunter, S. K. (2014). Sex differences in human fatigability: mechanisms and insight to physiological responses. *Acta Physiologica*, 210(4), 768–789.

Hurley F., B., Hanson D., E., & Sheaff K., A. (2011). Strength Training as a Countermeasure to Aging Muscle and Chronic Disease. *Sports Medicine*, 41(4), 289–306.

Huxley, A. F., & Niedergerke, R. (1954). Structural changes in muscle during contraction: Interference microscopy of living muscle fibres. *Nature*, 173(4412), 971–973.

Ichinose, Y., Kanehisa, H., Ito, M., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (1998). Relationship Between Muscle Fiber Pennation and Force Generation Capability in Olympic Athletes. *International Journal of Sports Medicine*, 19(08), 541–546.

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.

- 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(05), 351–358.
- Iglesias-Soler, E., Fernández-Del-Olmo, M., Mayo, X., Fariñas, J., Río-Rodríguez, D., Carballeira, E., ... Tuimil, J. L. (2017). Changes in the force-velocity mechanical profile after short resistance training programs differing in set configurations. *Journal of Applied Biomechanics*, 33(2), 144–152.
- Ikegawa, S., Funato, K., Tsunoda, N., Kanehisa, H., Fukunaga, T., & Kawakami, Y. (2008). Muscle Force per Cross-sectional Area is Inversely Related with Pennation Angle in Strength Trained Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1), 128–131.
- Ingham, S. a., Whyte, G. p., Pedlar, C., Bailey, D. m., Dunman, N., & Nevill, A. m. (2008). Determinants of 800-m and 1500-m Running Performance Using Allometric Models. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(2), 345–350.
- Izquierdo, M., Gonza, M., Navarro-amezqueta, I., L Calbet, J. A., Iban, J., Malanda, A., ... Gorostiaga, E. M. (2011). Effects of Strength Training on Muscle Fatigue Mapping from Surface EMG and Blood Metabolites. *Med. Sci. Sports Exerc*, 43(2), 303–311.
- Izquierdo, M., Ibañez, J., Calbet, J. A. L., Navarro-Amezqueta, I., González-Izal, M., Idoate, F., ... Almar, M. (2009). Cytokine and hormone responses to resistance training. *Eur J Appl Physiol*, 107, 397–409.
- Izquierdo, M., Ibañez, J., González-Badillo, J. J., Häkkinen, K., Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., ... Gorostiaga, E. M. (2006). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *Journal of Applied Physiology*, 100(5), 1647–1656.

- Izquierdo, M., Ibañez, J., González-Badillo, J. J., Häkkinen, K., Ratamess, N. a, Kraemer, W. J., ... Gorostiaga, E. M. (2006). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *100*(5), 1647–1656.
- Jamurtas, A. Z., Fatouros, I. G., Buckenmeyer, P. J., Kokkinidis, E., Taxildaris, K., Kambas, A., & Kyriazis, G. (2000). Effects of plyometric exercise on muscle soreness and plasma creatine kinase levels and Its comparison with eccentric and concentric exercise. *Article in The Journal of Strength and Conditioning Research*, *14*(1), 68–74.
- Janicijevic, D., González-Hernández, J. M., Gu, Y., & Garcia-Ramos, A. (2020). Differences in the magnitude and reliability of velocity variables collected during 3 variants of the bench press exercise. *Journal of Sports Sciences*, *38*(7), 759–766.
- Jaric, S. (2016). Two-load method for distinguishing between muscle force, velocity, and power-producing capacities. *Sports Medicine*, *46*(11), 1585–1589.
- Jiménez-Reyes, P., & González-Badillo, J. J. (2011). Monitoring training load through the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics. *Cultura, Ciencia y Deporte*, *7*(18), 207–217.
- Jimenez-Reyes, P., Pareja-Blanco, F., Cuadrado-Peñafiel, V., Morcillo, J., Párraga, J., & González-Badillo, J. (2016). Mechanical, metabolic and perceptual response during sprint training. *International Journal of Sports Medicine*, *37*(10), 807–812.
- Jiménez Reyes, P., Samozino, P., Pareja Blanco, F., Conceicao, F., Cuadrado Penafiel, V., Gonzalez Badillo, J. J., & Morin, J. B. (2017). Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(1), 36–43.
- Joonyoung, K., & Joohyung, L. (2015). The relationship of creatine kinase variability

- with body composition and muscle damage markers following eccentric muscle contractions. *J. Exerc. Nutr. Biochem*, 19(2), 123–129.
- Jusoh, A., Shak, A., & Tufano, J. J. (2019). Integrated power training mode in soccer: merging complex training with cluster set. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 9(1), 1192–1202.
- Karatzafiri, C., De Haan, A., Ferguson, R. A., Van Mechelen, W., & Sargeant, A. J. (2001). Phosphocreatine and ATP content in human single muscle fibres before and after maximum dynamic exercise. *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 442(3), 467–474.
- Kingma, J. J., de Knikker, R., Wittink, H. M., & Takken, T. (2007). Eccentric overload training in patients with chronic Achilles tendinopathy: a systematic review. *British Journal of Sports Medicine*, 41(6), e3.
- Koch, A., Pereira, R., & Machado, M. (2014). The creatine kinase response to resistance exercise. *Journal of Musculoskeletal Neural Interact*, 14(1), 68–77. Retrieved from
- Kondakova, I., Lissi, E. A., & Pizarro, M. (1999). Total reactive antioxidant potential in human saliva of smokers and non-smokers. *IUBMB Life*, 47(6), 911–920.
- Koo, T. K., & Li, M. Y. (2016). A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163.
- Kraemer, W. J., Dziados, J. E., Marchitelli, L. J., Gordon, S. E., Harman, E. A., Mello, R., ... Frykman, P. N. (1993). Effects of different heavy-resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 74(1), 450–459.
- Kraemer, W. J., Loebel, C. C., Volek, J. S., Ratamess, N. A., Newton, R. U., Wickham, R. B., ... Haè, K. (2001). The effect of heavy resistance exercise on the circadian rhythm of salivary testosterone in men. *European Journal of Applied Physiology*,

84(1–2), 13–28.

Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of Resistance Training : Progression and Exercise Prescription. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36(4), 674–688.

Kraemer, W., Noble, B., Clark, M., & Culver, B. (1987). Physiologic Responses to Heavy-Resistance Exercise with Very Short Rest Periods*. *International Journal of Sports Medicine*, 08(04), 247–252.

Kruger, C., Breunig, C., BiskupekSigwart, J., & Dorr, H. (1996). Problems with salivary 17-hydroxyprogesterone determinations using the Salivette(R) device. *Eur J Clin Chem Clin Biochem*, 34(11), 927–930.

Kuzkaya, N., Weissmann, N., Harrison, D. G., & Dikalov, S. (2005). Interactions of peroxynitrite with uric acid in the presence of ascorbate and thiols: Implications for uncoupling endothelial nitric oxide synthase. *Biochemical Pharmacology*, 70(3), 343–354.

Lamey, P., & Nolan, A. (1994). The recovery of human saliva using the Salivette system. *Eur J Clin Chem Clin Biochem*, 32(9), 727–728.

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.

Latham, N. K., Bennett, D. a, Stretton, C. M., & Anderson, C. S. (2004). Systematic review of progressive resistance strength training in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 59(1), 48–61.

Lawton, T. W., Cronin, J. B., & Lindsell, R. P. (2006). Effect of interrepetition rest intervals on weight training repetition power output. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 20(1), 172–176.

- Lawton, T. W., Cronin, J., Drinkwater, E., Lindsell, R. P., & Pyne, D. B. (2004). The effect of continuous repetition training and intra-set rest training on bench press strength and power. *Journal of Sport Medicine and Physical Fitness*, 44(4), 361–367.
- Leong, B., Kamen, G., Patten, C., & Burke, J. R. (1999). Maximal motor unit discharge rates in the quadriceps muscles of older weight lifters. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 31(11), 1638–1644.
- Leppik, J. A., Aughey, R. J., Medved, I., Fairweather, I., Carey, M. F., Mckenna, M. J., & Fair-Weather, I. (2004). Prolonged exercise to fatigue in humans impairs skeletal muscle Na-K-ATPase activity, sarcoplasmic reticulum Ca²⁺ release, and Ca²⁺ uptake. *J Appl Physiol*, 97(4), 1414–1423.
- Lindsay, A., Costello, J. T., & Lindsay, A. (2017). Realising the Potential of Urine and Saliva as Diagnostic Tools in Sport and Exercise Medicine. *Sports Medicine*, 47(1), 11–31.
- Lippi, G., Schena, F., Salvagno, G. L., Montagnana, M., Gelati, M., Tarperi, C., ... Guidi, G. C. (2008). Acute variation of biochemical markers of muscle damage following a 21-km, half-marathon run. *The Scandinavian Journal of Clinical & Laboratory Investigation*, 68(7), 667–672.
- Loturco, I., Nakamura, F. Y., Kobal, R., Gil, S., Cal Abad, C. C., Cuniyochi, R., ... Roschel, H. (2015). *Training for Power and Speed*. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(10), 2771–2779.
- Macgregor, L. J., & Hunter, A. M. (2018). High-threshold motor unit firing reflects force recovery following a bout of damaging eccentric exercise. *Plos ONE*, 13(4), e0195051.
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *European Journal of Applied Physiology*, 116(6),

1091–1116.

Maganaris, C. N., Baltzopoulos, V., & Sargeant, A. J. (1998). In vivo measurements of the triceps surae complex architecture in man: implications for muscle function. *The Journal of Physiology*, *512*(2), 603–614.

Manolopoulos, E., Papadopoulos, C., Salonikidis, K., Katartzi, E., & Poluha, S. (2004). Strength training effects on physical conditioning and instep kick kinematics in young amateur soccer players during preseason. *Perceptual and Motor Skills*, *99*(2), 701–710.

Marcos Pardo, P. J., González Hernández, J. M., García Ramos, A., López Vivancos, A., & Jiménez Reyes, P. (2019). Movement velocity can be used to estimate the relative load during the bench press and leg press exercises in older women. *PeerJ*, *7*, e7533.

Marino, F. E., Gard, M., & Drinkwater, E. J. (2011). The limits to exercise performance and the future of fatigue research. *British Journal of Sports Medicine*, *45*(1), 65–67.

Marquez, G., Romero-arenas, S., Mar, C., Vera-Ibañez, A., Fernandez-Del-Olmo, M., & Taube, W. (2016). Peripheral and central fatigue after high intensity. *Muscle and Nerve*, *56*(1), 152–159.

Marshall, P., 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.

Marshall, P. W. M., McEwen, M., & Robbins, D. W. (2011). Strength and neuromuscular adaptation following one, four, and eight sets of high intensity resistance exercise in trained males. *European Journal of Applied Physiology*, *111*(12), 3007–3016.

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., I. M. D., Yocum, A., & Harber, M. (2007). Effect of explosive versus slow contractions and exercise intensity on energy expenditure. *Medicine & Science in Sport Exercise*, 39(8), 1291–1301.
- McLellan, Christopher P, Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(2), 379–385.
- McLellan, Cristopher P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2010). Creatine kinase and endocrine responses of elite players pre, during, and post rugby league match play. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 2908–2919.
- Melnyk, J. A., Rogers, M. A., & Hurley, B. F. (2009). Effects of strength training and detraining on regional muscle in young and older men and women. *European Journal of Applied Physiology*, 105(6), 929–938.
- Mendiguchia, J., Edouard, P., Samozino, P., Brughelli, M., Cross, M., Ross, A., ... Morin, J. B. (2016). Field monitoring of sprinting power–force–velocity profile before, during and after hamstring injury: two case reports. *Journal of Sports Sciences*, 34(6), 535–541.
- Mendiguchia, Jurdan, Martinez ruiz, E., Edouard, P., Morin, J., Martinez martinez, F., Idoate, F., & Mendez villanueva, A. (2017). A multifactorial, criteria-based progressive algorithm for hamstring injury treatment. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(7), 1482–1492.
- Merrigan, J. J., Tufano, J. J., Oliver, J. M., White, J. B., Fields, J. B., & Jones, M. T. (2020). Reducing the loss of velocity and power in women athletes via rest redistribution. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 15(2), 255–261.

- Mike, J., Kerksick, C. M., & Kravitz, L. (2015). How to incorporate eccentric training into a resistance training program. *Strength and Conditioning Journal*, 37(1), 5–17.
- Millet, G., Bachasson, D., Temesi, J., & ... B. W. (2012). Potential interests and limits of magnetic and electrical stimulation techniques to assess neuromuscular fatigue. *Neuromuscular Disorder*, 22, 182–186.
- Minetto, M., Rainoldi, A., Gazzoni, M., Terzolo, M., Borriero, P., Termine, A., ... Paccotti, P. (2005). Differential responses of serum and salivary interleukin-6 to acute strenuous exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 93(5–6), 679–686.
- Miranda, H., Simão, R., Moreira, L. M., de Souza, R. A., de Souza, J. A. A., de Salles, B. F., & Willardson, J. M. (2009). Effect of rest interval length on the volume completed during upper body resistance exercise. *Journal of Sports Science & Medicine*, 8(3), 388–392.
- Mirzaii-Dizgah, I., & Jafari-Sabet, M. (2011). Unstimulated whole saliva creatine phosphokinase in acute myocardial infarction. *Oral Diseases*, 17(6), 597–600.
- Monteiro, P. A., Campos, E. Z., de Oliveira, F. P., Peres, F. P., Rosa-Neto, J. C., Pimentel, G. D., & Lira, F. S. (2016). Modulation of inflammatory response arising from high-intensity intermittent and concurrent strength training in physically active males. *Cytokine*, 91, 104–109.
- Mora-Custodio, R., Rodríguez-Rosell, D., Pareja-Blanco, F., Yáñez-García, J. M., & González-Badillo, J. J. (2016). Effect of low- vs moderate-load squat training on strength, jump and sprint performance in physically active women. *International Journal of Sports Medicine*, 37(6), 476–482.
- 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. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(4), 930–937.
- Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., Sánchez-Medina, L., Mora-Rodríguez, R., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Movement velocity as a measure of level of effort during resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(6), 1496–1504.
- Morcillo, J. A., Jimenez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Lozano, E., Ortega-Becerra, M., & Párraga, J. (2015). Relationships between repeated sprint ability, mechanical parameters, and blood metabolites in professional soccer players. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(6), 1673–1682.
- Morel, B., Lapole, T., Liotard, C., & Hautier, C. (2019). Critical peripheral fatigue thresholds among different force-velocity conditions: An individual-based model approach. *Frontiers in Physiology*, 10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00875>
- Munn, J., Herbert, R. D., Hancock, M. J., & Gandevia, S. C. (2005). Training with unilateral resistance exercise increases contralateral strength. *Journal of Applied Physiology*, 99(5), 1880–1884.
- Murphy, R. M., Stephenson, D. G., & Lamb, G. D. (2004). Effect of creatine on contractile force and sensitivity in mechanically skinned single fibers from rat skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 287(6), 1589–1595.
- Naclerio, F, & Larumbe-Zabala, E. (2016). Relative load prediction by velocity and the Omni-Res 0-10 scale in parallel squat. *Journal of Strength & Conditioning*

Research, 31(6), 1585–1591.

Naclerio, Fernando, & Larumbe-Zabala, E. (2016). Loading intensity prediction from velocity and the rate of perceived exertion in bench press. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Naclerio, Fernando, Rodríguez-Romo, G., Barriopedro-Moro, M. I., Jiménez, A., Alvar, B. A., & Triplett, N. T. (2011). Control of Resistance Training Intensity by the Omni Perceived Exertion Scale. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(7), 1879–1888.

Narici, M. V., Roi, G. S., Landoni, L., Minetti, A. E., & Cerretelli, P. (1989). Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 59(4), 310–319.

Navarro, R. M., Pérez, C. E., Mora, R., De, E., Sánchez, C., José, J., ... Sánchez, L. (2017). Time course of recovery following resistance training leading or not to failure. *European Journal of Applied Physiology*, 117(12), 2387–2399.

Newton, R. U., Häkkinen, K., Häkkinen, H., Häkkinen, A., McCormick, M., Volek, J., & Kraemer, W. J. (2002). Mixed-methods resistance training increases power and strength of young and older men. *Med. Sci. Sports Exerc*, 34(8), 1367–1375.

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.

Nielsen, J., & Kagamihara, Y. (1992). The regulation of disynaptic reciprocal Ia inhibition during co-contraction of antagonistic muscles in man. *The Journal of Physiology*, 456(1), 373–391.

Nimphius, S., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2012). Changes in Muscle

- Architecture and Performance During a Competitive Season in Female Softball Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(10), 2655–2666.
- Nóbrega, S. R., & Libardi, C. A. (2016). Is resistance training to muscular failure necessary? *Frontiers in Physiology*, 7(10), 75–78.
- Norrbrand, L., Tous-Fajardo, J., Vargas, R., & Tesch, P. A. (2011). Quadriceps muscle use in the flywheel and barbell squat. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 82(1), 13–19.
- Nosaka, K., & Newton, M. (2002). Concentric or eccentric training effect on eccentric exercise-induced muscle damage. *Med. Sci. Sports Exerc*, 34(1), 63.
- O’Leary, T. J., Morris, M. G., Collett, J., & Howells, K. (2016). Central and peripheral fatigue following non-exhaustive and exhaustive exercise of disparate metabolic demands. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 26(11), 1287–1300.
- Ochi, E., Maruo, M., Tsuchiya, Y., Ishii, N., Miura, K., & Sasaki, K. (2018). Higher training frequency is important for gaining muscular strength under volume-matched training. *Frontiers in Physiology*, 9, 744.
- Oliver, J. M., Jagim, A. R., Sanchez, A. C., Mardock, M. A., Kelly, K. A., Meredith, H. J., ... Kreider, R. B. (2013). Greater gains in strength and power with intraset rest intervals in hypertrophic training. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(11), 3116–3131.
- Oliver, J. M., Kreutzer, A., Jenke, S. C., Phillips, M. D., Mitchell, J. B., & Jones, M. T. (2015a). Velocity drives greater power observed during back squat using cluster sets. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 235–243.
- Oliver, J. M., Kreutzer, A., Jenke, S., Phillips, M. D., Mitchell, J. B., & Jones, M. T. (2015b). Acute response to cluster sets in trained and untrained men. *European*

Journal of Applied Physiology, 115(11), 2383–2393.

Paavolainen, L., Häkkinen, K., Hämmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology*, 86(5), 1527–1533.

Palastanga, N., Field, D., & Soames, R. (2007). *Anatomía y movimiento humano. Estructura y funcionamiento*. Paidotribo.

Pantoja, P. D., Alberton, C. L., Pilla, C., Vendrusculo, A. P., & Krueel, L. F. M. (2009). Effect of Resistive Exercise on Muscle Damage in Water and on Land. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(3), 1051–1054.

Papacosta, E., & Nassis, G. P. (2011). Saliva as a tool for monitoring steroid, peptide and immune markers in sport and exercise science. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 14(5), 424–434.

Pareja-Blanco, F., Villalba-Fernández, A., Cornejo-Daza, P., Sánchez-Valdepeñas, J., & González-Badillo, 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., Sánchez Medina, L., Sanchis Moysi, J., Dorado, C., Mora Custodio, R., ... González Badillo, J. J. (2016). Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 27(7), 724–735.

Pareja Blanco, Fernando, Rodríguez Rosell, D., & 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, Fernando, Rodríguez Rosell, D., Sánchez Medina, L., Ribas Serna, J.,

- López López, C., Mora Custodio, R., ... González Badillo, J. J. (2016). Acute and delayed response to resistance exercise leading or not leading to muscle failure. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 37(6), 630–639.
- Pareja Blanco, Fernando, Suarez Arrones, L., & González Badillo, J. J. (2017). Effects of Velocity Loss During Resistance Training on Performance in Professional Soccer Players. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 12(4), 512–519.
- Párraga Montilla, J. A., García Ramos, A., Castaño Zambudio, A., Capelo Ramírez, F., González Hernández, J. M., Cordero Rodríguez, Y., & Jiménez Reyes, P. (2018). Acute and delayed effects of a resistance training session leading to muscular failure on mechanical, metabolic, and perceptual responses. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Pasquet, B., Carpentier, A., Duchateau, J., & Hainaut, K. (2000). Muscle fatigue during concentric and eccentric contractions. *Muscle & Nerve*, 23(11), 1727–1735.
- Pearson, S. N., Cronin, J. B., Hume, P. A., & Slyfield, D. (2009). Kinematics and kinetics of the bench-press and bench-pull exercises in a strength-trained sporting population. *Sports Biomechanics*, 8(3), 245–254.
- Perez-Castilla, A., Piepoli, A., Delgado-García, G., Garrido-Blanca, G., & Garcia-Ramos, A. (2020). Reliability and concurrent validity of 7 commercially available devices for the assessment of movement velocity at different intensities during the bench press. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(5), 1258–1265.
- Pérez-Castilla, A, García-Ramos, A., Padial, P., Morales-Artacho, A., & Feriche, B. (2017). Load-velocity relationship in variations of the half-squat exercise: Influence of execution technique. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
- Pérez-Castilla, Alejandro, McMahon, J. J., Comfort, P., & García-Ramos, A. (2020).

Assessment of loaded squat jump height with a free-weight barbell and smith machine. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(3), 671–677.

Pérez Castilla, A., García Ramos, A., Padial, P., Morales Artacho, A. J., & Feriche, B. (2018). Effect of different velocity loss thresholds during a power-oriented resistance training program on the mechanical capacities of lower-body muscles. *Journal of Sports Sciences*, 36(12), 1331–1339.

Pérez Castilla, A., Jaric, S., Feriche, B., Padial, P., & García Ramos, A. (2018). Evaluation of muscle mechanical capacities through the two-load method: optimization of the load selection. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(5), 1245–1253.

Pérez Castilla, Alejandro, Piepoli, A., Garrido Blanca, G., Delgado García, G., Balsalobre Fernández, C., & García Ramos, A. (2019). Precision of 7 Commercially Available Devices for Predicting the Bench Press 1-Repetition Maximum From the Individual Load-Velocity Relationship. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, (April), 1–13.

Phillips, S. (2015). *Fatigue in Sport and Exercise* (Routledge).

Prasartwuth, O., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2005). Maximal force, voluntary activation and muscle soreness after eccentric damage to human elbow flexor muscles. *Journal of Physiology*, 567(1), 337–348.

Prokopchuk, O., Prokopchuk, O., Liu, Y., Wang, L., Wirth, K., & Schmidt, D. (2007). Skeletal muscle IL-4, IL-4R α , IL-13 and IL-13R α 1 expression and response to strength training. *Exercise Immunology Review*, 13, 67-75.

Raeder, C., Wiewelhove, T., De Paula Simola, R. Á., Kellmann, M., Meyer, T., Pfeiffer, M., & Ferrauti, A. (2016). Assessment of fatigue and recovery in male and female athletes following six days of intensified strength training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(12), 3412–3427.

- Rahimi, Raham. (2005). Effect of different rest intervals on the exercise volume completed during squat bouts. *Journal of Sports Science & Medicine*, 4(4), 361–366.
- Rahimi, Rahman, Sadeghi, S., Mozafari', B. ' A., & Faraji, H. (2009). The effects of different rest intervals between sets on the training volume of female athletes. *International Journal of Fitness*, 5(1), 61–67.
- Ratamess, N. A., Alvar, B. A., Evetoch, T. E., Housh, T. J., Ben Kibler, W., Kraemer, W. J., & Triplett, N. T. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(3), 687–708.
- Rathleff, M. S., Thorborg, K., & Bandholm, T. (2013). Concentric and eccentric time-under-tension during strengthening exercises: validity and reliability of stretch-sensor recordings from an elastic exercise-band. *PLoS ONE*, 8(6).
- Rhea, M. R., Alvar, B. A., Burkett, L. N., & Ball, S. D. (2003). A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 35(3), 456–464.
- Rial-Vázquez, J., Mayo, X., Tufano, J. J., Fariñas, J., Rúa-Alonso, M., & Iglesias-Soler, E. (2020). Cluster vs. traditional training programmes: changes in the force-velocity relationship. *Sports Biomechanics*, 1–19.
- Riis, J., Bryce, C., Hand, T., Bayer, J., Matin, M., Stebbins, J., ... Granger, D. (2018). The validity, stability, and utility of measuring uric acid in saliva: A salivary bioscience-biobehavioral research interface. *Biomarkers in Medicine*, 12(6), 583–596.
- Río-rodríguez, D., Iglesias-soler, E., & Fernández, M. (2016). Set configuration in resistance exercise: muscle fatigue and cardiovascular effects. *Plos One*, 11(3), 1–18.
- Robertson, R. J., Goss, F. L., Rutkowski, J., Lenz, B., Dixon, C., Timmer, J., ...

- Andreacci, J. (2003). Concurrent validation of the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(2), 333–341.
- Rodríguez-Lorenzo, L., Fernandez-Del-Olmo, M., Sanchez-Molina, J. A., & Acero, R. M. (2016). Role of Vertical Jumps and Anthropometric Variables in Maximal Kicking Ball Velocities in Elite Soccer Players. *Journal of Human Kinetics*, 53(1), 143–153.
- Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., Ravelo-García, A. G., Ribas-Serna, J., & González-Badillo, J. J. (2020). Velocity-based resistance training: Impact of velocity loss in the set on neuromuscular performance and hormonal response. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, apnm-2019-0829.
- Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Torres-Torrelo, J., Mora-Custodio, R., Marques, M. C., & González-Badillo, J. J. (2018). Effort index as a novel variable for monitoring the level of effort during resistance exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(8), 2139–2153.
- Rodríguez Rosell, D., Franco Márquez, F., Pareja Blanco, F., Mora Custodio, R., Yáñez García, J. M., González Suárez, J. M., & González Badillo, J. J. (2016). Effects of 6 weeks resistance training combined with plyometric and speed exercises on physical performance of pre-peak-height-velocity soccer players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(2), 240–246.
- Rohleder, N., & Nater, U. M. (2009). Determinants of salivary alpha-amylase in humans and methodological considerations. *Psychoneuroendocrinology*, 34(4), 469–485.
- Roig, M., O'Brien, K., Kirk, G., Murray, R., McKinnon, P., Shadgan, B., & Reid, W. D. (2009). The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 43(8), 556–568.

- Roth, S., Ferrell, R., & Hurley, B. (2000). Strength training for the prevention and treatment of sarcopenia. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 4(3), 143–155.
- Rotto, D. M., & Kaufman, M. P. (1988). Effect of metabolic products of muscular contraction on discharge of group III and IV afferents. *Journal of Applied Physiology*, 64(6), 2306–2313.
- Ruiz, J. R., Sui, X., Lobelo, F., Morrow Jr., J. R., Jackson, A. W., Sjostrom, M., & Blair, S. N. (2008). Association between muscular strength and mortality in men: prospective cohort study. *BMJ*, 337, a439.
- Sale, D. G., Jacobs, I., Macdougall, J. D., & Garner, S. (1990). Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(3), 348–356.
- Samozino, P., Morin, J. B., Frédérique, H., & Alain, B. (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, 41(14), 2940–2945.
- Sampson, J., & ... H. G. (2016). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(4), 375–383.
- Sanborn, K., Boros, R., Hruby, J., Schilling, B., O'Bryant, H. S., Johnson, R. L., ... & Stone, M. H. (2000). Short-term performance effects of weight training with multiple sets not to failure vs. a single set to failure in women. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 14(3), 328–331.
- Sánchez-Medina, L., González-Badillo, J. J., Pérez, C. E., & Pallarés, J. G. (2014). Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. bench press exercises. *International Journal of Sports Medicine*, 35(3), 209–216. h
- Sanchez-Medina, L., Perez, C. E., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2010). Importance of the propulsive phase in strength assessment. *International Journal of Sports*

Medicine, 31(2), 123–129.

Sánchez-Moreno, M., Rodríguez-Rosell, D., Pareja-Blanco, F., Mora-Custodio, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Movement velocity as indicator of relative intensity and level of effort attained during the set in pull-up exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(10), 1378–1384.

Sánchez Medina, L., & González Badillo, J. J. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(9), 1725–1734.

Schiaffino, S., & Reggiani, C. (1996). Molecular diversity of myofibrillar proteins: Gene regulation and functional significance. *Physiological Reviews*, 76(2), 371–423.

Schjerve, I. E., Tyldum, G. A., Tjønnå, A. E., Stølen, T., Loennechen, J. P., Hansen, H. E. M., ... Wisløff, U. (2008). Both aerobic endurance and strength training programmes improve cardiovascular health in obese adults. *Clinical Science*, 115(9), 283–293.

Schoenfeld, B.J., Ogborn, D., & Krieger, J. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 35(11), 1073–1082.

Schoenfeld, Brad. (2013). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Medicine*, 43(3), 179–194.

Schoenfeld, Brad. (2016). *Science and development of muscle hypertrophy*. Human Kinetics.

Schoenfeld, Brad J., Ogborn, D., Vigotsky, D., Franchi, M. V., & Krieger, J. W. (2017). Hypertrophic effects of concentric vs. eccentric muscle actions: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 31(9),

2599–2608.

- Schoenfeld, Brad J., Pope, Z. K., Benik, F. M., Hester, G. M., Sellers, J., Nooner, J. L., ... Krieger, J. W. (2016). Longer interset rest periods enhance muscle strength and hypertrophy in resistance-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(7), 1805–1812.
- Schoenfeld, Brad J., Ratamess, N. A., Peterson, M. D., Contreras, B., & Tiryaki-Sonmez, G. (2015). Influence of resistance training frequency on muscular adaptations in well-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(7), 1821–1829.
- Schoenfeld, Brad J. (2010a). Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 24(12), 3497–3506.
- Schoenfeld, Brad J. (2010b). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857–2872.
- Schoenfeld, Brad J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of low- vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(10), 2954–2963.
- Schoenfeld, Brad J., Grgic, J., & Krieger, J. (2019). How many times per week should a muscle be trained to maximize muscle hypertrophy? A systematic review and meta-analysis of studies examining the effects of resistance training frequency. *Journal of Sports Sciences*, 37(11), 1286–1295.
- Schoenfeld, Brad, & Williams, M. (2012). Are Deep Squats a Safe and Viable Exercise? *Strength and Conditioning Journal*, 34(2), 34–36.
- Schott, J., McCully, K., & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength

- training. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 71(4), 337–341.
- Schwanbeck, S., Chilibeck, P. D., & Binsted, G. (2009). A comparison of free weight squat to smith machine squat using electromyography. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(9), 2588–2591.
- Scott, W., Stevens, J., & Binder–Macleod, S. A. (2001). Human Skeletal Muscle Fiber Type Classifications. *Physical Therapy*, 81(11), 1810–1816.
- Senna, G., Salles, B. F., Prestes, J., Mello, R. A., & Simão, R. (2009). Influence of two different rest interval lengths in resistance training sessions for upper and lower body. *Journal of Sports Science and Medicine*, 8(2), 197–202.
- Sheppard, J., Hobson, S., Barker, M., Taylor, K., Chapman, D., McGuigan, M., & Newton, R. (2008). The effect of training with accentuated eccentric load counter-movement jumps on strength and power characteristics of high-performance volleyball players. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 3(3), 355–363.
- Shirtcliff, E. A., Granger, D. A., Schwartz, E., & Curran, M. J. (2001). Use of salivary biomarkers in biobehavioral research: cotton-based sample collection methods can interfere with salivary immunoassay results. *Psychoneuroendocrinology*, 26(2), 165–173.
- Silvers-Granelli, H. J., Bizzini, M., Arundale, A., Mandelbaum, B. R., & Snyder-Mackler, L. (2017). Does the FIFA 11+ Injury prevention program reduce the incidence of ACL injury in male soccer players? *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 475(10), 2447–2455.
- Skovdal Rathleff, M., Thorborg, K., & Bandholm, T. (2013). Concentric and Eccentric Time-Under-Tension during Strengthening Exercises: Validity and Reliability of Stretch-Sensor Recordings from an Elastic Exercise-Band. *PLoS ONE*, 8(6), e68172.

- Smilios, I. (1998). Effects of varying levels of muscular fatigue on leg power. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 12(3), 2004–2008.
- Soriano, M. A., Jiménez-Reyes, P., Rhea, M. R., & Marín, P. J. (2015). The optimal load for maximal power production during lower-body resistance exercises: A meta-analysis. *Sports Medicine*, 45(8), 1191–1205.
- Souron, R., Nosaka, K., & Jubeau, M. (2018). Changes in central and peripheral neuromuscular fatigue indices after concentric versus eccentric contractions of the knee extensors. *European Journal of Applied Physiology*, 118(3), 805–816.
- Spiering, B., Kraemer, W., Anderson, J., Armstrong, L., Nindl, B., Volek, J., & Maresh, C. (2008). Resistance exercise biology: manipulation of resistance exercise programme variables determines the responses of cellular and molecular signalling pathways. *Sports Medicine*, 38(7), 527–540.
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., Bellon, C. R., & Stone, M. H. (2018). The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Medicine*, 48(4), 765–785.
- Tan, B. (1999). *Manipulating Resistance Training Program Variables to Optimize Maximum Strength in Men: A Review*. *Journal of Strength & Conditioning Research* (Vol. 13).
- Taylor, J. L., Amann, M., Duchateau, J., Meeusen, R., & Rice, C. L. (2016). Neural contributions to muscle fatigue: From the brain to the muscle and back again. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(11), 2294–2306.
- Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2008). A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions. *Journal of Applied Physiology*, 104(2), 542–550.
- Thomas, K., Brownstein, C. G., Dent, J., Parker, P., Goodall, S., & Howatson, G. (2018). Neuromuscular fatigue and recovery after heavy resistance, jump, and sprint training. *Medicine & Science in Sport Exercise*, 50(12), 2526–2535.

- Thorpe, R., & Sunderland, C. (2012). Muscle damage, endocrine, and immune marker response to a soccer match. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(10),
- Todd, G., Gorman, R. B., & Gandevia, S. C. (2004). Measurement and reproducibility of strength and voluntary activation of lower-limb muscles. *Muscle & Nerve*, 29(6), 834–842.
- Todd, J. S., Shurley, J. P., & Todd, T. C. (2012). Thomas L. DeLorme and the science of progressive resistance exercise. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(11), 2913–2923.
- 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. h
- Tous-Fajardo, J., Gonzalo-Skok, O., Arjol-Serrano, J. L., & Tesch, P. (2016). Enhancing Change-of-Direction Speed in Soccer Players by Functional Inertial Eccentric Overload and Vibration Training. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(1), 66–73.
- Tran, Q. T., Docherty, D., & Behm, D. (2006). The effects of varying time under tension and volume load on acute neuromuscular responses. *European Journal of Applied Physiology*, 98(4), 402–410.
- Trinidad, J., Chacón, Q., Francisco, E., Meneses, E., Sierra Muñiz, G., Ramos-Jimenez, A., ... Cruz, G. H. (2018). Central and peripheral fatigue related to the type of exercise. *Preprints*, (November), 1–11.
- Tufano, J. J., Brown, L. E., & Haff, G. G. (2016). 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., Harry, G., Williamson, B. D., ... Centre, P. (2016). Cluster sets permit greater mechanical stress without decreasing relative velocity. *International Journal of Sports Physiology & Performance*, 12(4), 463–469.
- Tufano, J. J., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Seitz, L. B., Williamson, B. D., & Gregory Haff, 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., Conlon, J. A., Nimphius, S., Brown, L. E., Seitz, L. B., Williamson, B. D., & Haff, G. G. (2016). Cluster Sets Maintain Velocity and Power During High-Volume Back Squats. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 11(1), 86–95.
- Tufano, J. J., Nimphius, S., Oliver, J. M., Conlon, J. A., Kreutzer, A., Gregory Haff, G., & Tufano, J. (2017). Different Cluster Sets Result In Similar Metabolic, Endocrine, And Perceptual Responses In Trained Men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(3), 346-354.
- Tvarijonaviciute, A., Barranco, T., Rubio, M., Carrillo, J. M., Martinez-Subiela, S., Tecles, F., ... Cerón, J. J. (2017). Measurement of creatine kinase and aspartate aminotransferase in saliva of dogs: a pilot study. *BCM Veterinary Research*, 13(1), 168.
- Twist, C., & Eston, R. (2005). The effects of exercise-induced muscle damage on maximal intensity intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, 94(5–6), 652–658.
- Van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *The Journal of Physiology*, 513(1), 295–305.
- Vasconcelos, G., Costa, D., & Santos, T. M. (2019). Do traditional and cluster-set

resistance training systems alter the pleasure and effort perception in trained men? *Article in Journal of Physical Education and Sport*, 19(3), 823–828.

Vieira, J. G., Dias, M. R., Lacio, M., Filipe, L., & Leitao, M. (2019). Resistance training with repetition to failure or not on muscle strength and perceptual responses. *Article in Journal of Exercise Physiology Online*, 16(3).

Wagle, J. P., Cunanan, A. J., Carroll, K. M., Sams, M. L., Wetmore, A., Bingham, G. E., ... Stone, M. H. (2018). Accentuated eccentric loading and cluster set configurations in the back squat: A kinetic and kinematic analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Wagle, J. P., Taber, C. B., Cunanan, A. J., Bingham, G. E., Carroll, K. M., DeWeese, B. H., ... Stone, M. H. (2017). Accentuated eccentric loading for training and performance: A review. *Sports Medicine*, 47(12), 2473–2495.

Wagle, J., Taber, C., Carroll, K., Cunanan, A., Sams, M., Wetmore, A., ... Stone, M. (2018). Repetition-to-repetition differences using cluster and accentuated eccentric loading in the back squat. *Sports*, 6(3), 59.

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), 1–12.

Weakley, J., Wilson, K., Till, K., Banyard, H., Dyson, J., Phibbs, P., ... Jones, B. (2018). Show me, tell me, encourage me: The effect of different forms of feedback on resistance training performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

Wells, G. D., Selvadurai, H., & Tein, I. (2009). Bioenergetic provision of energy for muscular activity. *Paediatric Respiratory Reviews*, 10(3), 83–90.

Westerblad, H., Duty, S., & Allen, G. (1993). Intracellular calcium concentration during low-frequency fatigue in isolated single fibers of mouse skeletal

- muscle. *American Physiological Society*, 75(1), 382–388.
- Westerblad, H., Lee, J. A., Lannergren, J., & Allen, D. G. (1991). Cellular mechanisms of fatigue in skeletal muscle. *American Journal of Physiology-Cell Physiology*, 261(2), 195–209.
- Westerblad, Håkan, Allen, D. G., & Lännergren, J. (2002). Muscle fatigue: Lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *Physiology*, 17(1), 17–21.
- Willardson, J. M. (2006). A brief review: Factors affecting the length of the rest interval between resistance exercise sets. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 978
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2005). A comparison of 3 different rest intervals on the exercise volume completed during a workout. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1), 23–26.
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2008). The effect of different rest intervals between sets on volume components and strength gains. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1), 146–152.
- Wong, D. T. (2006). Salivary diagnostics powered by nanotechnologies, proteomics and genomics. *Journal of the American Dental Association (1939)*, 137(3), 313–321.
- Zajac, A., Chalimoniuk, M., Maszczyk, A., Gotas, A., & Lngfort, J. (2015). Central and peripheral fatigue during resistance exercise – A critical review. *Journal of Human Kinetics*, 49(1), 159–169.
- Zaras, N. D., Stasinaki, A. E., Krase, A. A., Methenitis, S. K., Karampatsos, G. P., Georgiadis, G. V., ... Terzis, G. D. (2014). Effects of tapering with light vs. heavy loads on track and field throwing performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(12), 3484–3495.

- Zhang, B.-T., Yeung, S. S., Allen, D. G., Qin, L., & Yeung, E. W. (2008). Role of the calcium-calpain pathway in cytoskeletal damage after eccentric contractions. *Biology of Physical Activity in Youth J Appl Physiol*, 105(1), 352–357.
- Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. a., Jo, E., ... Blanco, R. (2016). Novel resistance training-specific RPE scale measuring repetitions in reserve. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 267–275.

XVIII

Anexos

XVIII/ ANEXOS**■ Publicaciones Científicas:****Estudio I**

Estado: Publicado (2020) 34(6), 1581-1590.

Título: Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat.

Autores:González-Hernández, J., García-Ramos, A., Capelo-Ramírez, F., Castaño-Zambudio, A., Marquez, G., Boullosa, D., & Jiménez-Reyes, P

Revista: Journal of Strength and Conditional Research Q1

Estudio II

Estado: Publicado (2019). 8(9), 389.

Título: Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow, and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva.

Autores: Jorge M González-Hernández, Lorena Franco, David Colomer-Poveda, Silvia Martínez-Subiela, Ramón Cugat, José J Cerón, Gonzalo Márquez, Luis M Martínez-Aranda, Pedro Jimenez-Reyes and Asta Tvarijonaviciute

Revista: Antioxidants Q1

Estudio III

Estado: Aceptado

Título: Effect of different interset rest intervals on movement velocity during the squat and bench press exercises

Autores: Jorge M González-Hernández, Pedro Jiménez-Reyes, Danica Janicijevic, James J Tufano, Gonzalo Márquez, Amador García-Ramos

Revista: Sport Biomechanics Q2

Estudio IV

Estado: En Revisión

Título: Response of muscle damage markers in serum and saliva to an accentuated

eccentric training protocol

Autores: Jorge M. González-Hernández, Pedro Jiménez-Reyes, José J Cerón, Asta Tvarijonaviciute, Francisco J. Llorente-Canterano, Luis M. Martínez-Aranda, Amador García-Ramos.

Revista: Journal of Strength and Conditional Research Q1

Estudio V

Estado: En Revision

Título: Resistance training to failure vs. not to failure: acute and delayed markers of mechanical, neuromuscular and biochemical fatigue

Autores: Jorge M González-Hernández, Amador García-Ramos, David Colomer-Poveda, Asta Tvarijonaviciute, José Cerón, Pedro Jiménez-Reyes, Gonzalo Márquez.

Revista: Journal of Strength and Conditional Research Q1

Estudio I

MECHANICAL, METABOLIC, AND PERCEPTUAL ACUTE RESPONSES TO DIFFERENT SET CONFIGURATIONS IN FULL SQUAT

JORGE M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ,¹ AMADOR GARCÍA-RAMOS,^{2,3} ADRIÁN CASTAÑO-ZAMBUDIO,¹ FERNANDO CAPELO-RAMÍREZ,¹ GONZALO MARQUEZ,¹ DANIEL BOULLOSA,^{4,5} AND PEDRO JIMÉNEZ-REYES¹

¹Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio, Murcia, Spain; ²Department of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Granada, Granada, Spain; ³Faculty of Education, Catholic University of the Holy Conception, Concepción, Chile; ⁴Post-Graduate Program in Physical Education, Catholic University of Brasília, Brasília, Brazil and ⁵Sport and Exercise Science, College of Healthcare Sciences, James Cook University, Townsville, QLD, Australia

ABSTRACT

González-Hernández, JM, García-Ramos, A, Castaño-Zambudio, A, Capelo-Ramírez, F, Marquez, G, Boullosa, D, and Jiménez-Reyes, P. Mechanical, metabolic, and perceptual acute responses to different set configurations in full squat. *J Strength Cond Res* 34(6): 1581–1590, 2020—This study aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between 2 traditional (TR) and 4 cluster (CL) set configurations. In a counterbalanced randomized order, 11 men were tested with the following protocols in separate sessions (sets × repetitions [interrepetition rest]): TR1: 3 × 10 [0 seconds]; TR2: 6 × 5 [0 seconds]; CL1: 3 × 10 [10 seconds]; CL2: 3 × 10 [15 seconds]; CL3: 3 × 10 [30 seconds]; CL4: 1 × 30 [15 seconds]. The exercise (full squat), number of repetitions (30), intersit rest (5 minutes), and resistance applied (10 repetition maximum) was the same for all set configurations. Mechanical fatigue was quantified by measuring the mean propulsive velocity during each repetition and the change in countermovement jump height observed after each set and after the whole training session. Metabolic and perceptual fatigue were assessed via the blood lactate concentration and the OMNI perceived exertion scale measured after each training set, respectively. The mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue were always significantly higher for the TR1 set configuration. The 2 set configurations that most minimized the mechanical measures of fatigue were CL2 and CL3. Perceived fatigue did not differ between the TR2, CL1, CL2, and CL3 set configurations. The lowest lactate concentration was observed in the CL3 set configuration. Therefore, both the CL2 and CL3 set configurations can be recommended because they maximize

mechanical performance. However, the CL2 set configuration presents 2 main advantages with respect to CL3 (a): it reduces training session duration, and (b) it promotes higher metabolic stress, which, to some extent, may be beneficial for inducing muscle strength and hypertrophy gains.

KEY WORDS lower-body strength, resistance training, interrepetition rest, neuromuscular fatigue

INTRODUCTION

Muscular strength, one of the components of physical fitness, is very important for enhancing both health status (30) and athletic performance (38). Resistance training is undeniably the most effective method to improve muscular strength (28). Previous research has focused on identifying the optimal manipulation of acute variables of resistance training (e.g., exercise type and order, number of sets and repetitions, loading magnitude, rest between sets, and movement velocity) for maximizing muscular strength gains in different populations (21,37). One acute variable of resistance training that has gone almost unnoticed is the possibility of implementing brief rest periods between the individual repetitions (interrepetition rest) or groups of repetitions (intra-set rest) performed within a training set (39). The training method that includes intermittent rest within a set is known as cluster training (11,12).

The primary effect of cluster set configurations is the reduction of fatigue when compared with traditional set configurations based on continuous repetitions (11). Previous studies have shown that cluster set configurations may increase both the quality (i.e., higher velocity and hence more power) and the volume (i.e., more repetitions per set) of resistance training sessions, while reducing perceived exertion (3–5,12,13,15–18,22,23,40). Thus, cluster training may be beneficial not only for athletes (14) but also for the general population because the same amount of work can be

Address correspondence to Jorge M. González-Hernández, jormigoh91@gmail.com.

34(6)/1581–1590

Journal of Strength and Conditioning Research
© 2017 National Strength and Conditioning Association

VOLUME 34 | NUMBER 6 | JUNE 2020 | 1581

Cluster Training and Acute Responses

done with less perception of effort (15). Because the most striking effect of cluster set configurations is the maintenance of velocity over a larger number of repetitions; previous literature has mainly focused on the effects of cluster sets on power adaptations, although the effects of cluster sets on maximum strength and hypertrophy adaptations have been less studied (39).

It has been argued that the lower metabolic stress induced by cluster set configurations may be detrimental to the induction of hypertrophic adaptations (5,26). In contrast, recent studies have suggested that training to failure (i.e., maximizing metabolic stress) may not be needed to maximize hypertrophic adaptations (31). In fact, performing only half the maximum possible number of repetitions per set (i.e., level of effort reduced by 50%) could be enough when the total volume (i.e., the number of repetitions) is controlled between the groups (19). In this regard, velocity loss has been proposed as a practical and valid criterion to decide when a training set should be stopped to maximize training adaptations (6,7,32). Therefore, cluster set configurations may be useful to increase the number of repetitions per set that can be performed before the critical fatigue threshold (assessed as velocity or power output losses) is reached (3). Greater training volumes are associated with greater hypertrophic adaptation (34). Thus, it would seem to be of interest to evaluate mechanical, metabolic, and perceptual responses to different cluster set configurations performed with the loads commonly applied during hypertrophy-oriented resistance training sessions.

Blood lactate is one of the most common markers of metabolic stress in resistance training research (10). Recent studies have revealed a good association between several markers of mechanical fatigue, such as velocity loss during a training set and countermovement jump (CMJ) height loss, and metabolic markers of fatigue, such as lactate and ammonia concentrations (20,24,32). Additionally, perceived exertion scales are becoming increasingly popular for monitoring resistance training fatigue (25,41). Although some of these markers of fatigue have been previously used to compare traditional and cluster set configurations, to the best of our knowledge, no study has used these 4 markers of fatigue (i.e., blood lactate concentration, velocity loss within a set, CMJ height loss, and perceived exertion) to compare the acute responses between traditional and cluster training.

Therefore, the objective of the current study was to assess the acute fatigue induced by 2 traditional training protocols differing in the level of effort (repetitions to failure vs. half the maximum number of repetitions) and 4 cluster training protocols differing in either the duration of the interrepetition rest period (10 vs. 15 vs. 30 seconds) or the number of sets performed (1 vs. 3). Specifically, we aimed to compare mechanical, metabolic, and perceptual responses between different traditional and cluster set configurations in the full squat exercise performed with 10 repetition maximum (RM) load (i.e., the load with which subjects can perform a maximum of 10 continuous repetitions). It was hypothe-

sized that all cluster set configurations would elicit lower mechanical, metabolic, and perceptual fatigue than both traditional set configurations.

METHODS

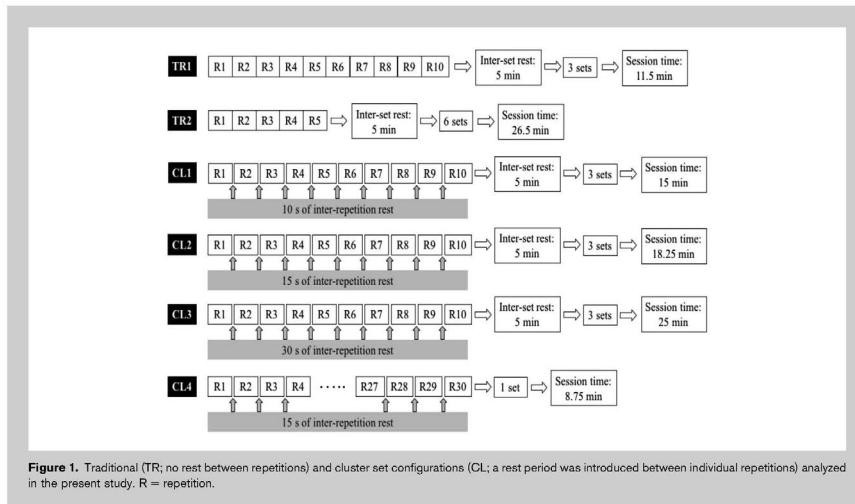
Experimental Approach to the Problem

A repeated-measures design was used to investigate the effect of different set configurations on mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue during multiple sets in the full squat exercise. Subjects came to the laboratory on 7 separate occasions over 4 consecutive weeks. The first testing session was used to ensure that all subjects included in the experiment were able to perform the full squat exercise using the proper technique and to identify their 10RM load. During the next 3 weeks, the subjects performed 2 sessions per week, separated by 48–72 hours. In each testing session, the subjects performed 1 of the 6 different set configurations in a counterbalanced randomized order. Specifically, 2 traditional (TR) set configurations (i.e., no rest between repetitions) differing in the level of effort (sets \times repetitions: TR1: 3 \times 10; TR2: 6 \times 5) and 4 different cluster (CL) set configurations differing in either the duration of the interrepetition rest period (sets \times repetitions [interrepetition rest]: CL1: 3 \times 10 [10 seconds]; CL2: 3 \times 10 [15 seconds]; CL3: 3 \times 10 [30 seconds]) or the number of sets (sets \times repetitions [IRR]: CL4: 1 \times 30 [15 seconds]) were assessed (Figure 1). The number of repetitions (30), the interset rest (5 minutes), and the load used (10RM) were the same for all set configurations. Sessions were performed in the afternoons, at the same time of day for each subject (+1 hour), and under constant environmental conditions (-20°C and $\sim 60\%$ humidity).

Mechanical fatigue was quantified by measuring the mean propulsive velocity (MPV) during each repetition and the change in CMJ height observed after each set and after the whole training session. Metabolic fatigue was assessed via the blood lactate concentration measured after each training set. Finally, perceptual fatigue was assessed with the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise (29) at the end of each set.

Subjects

Eleven strength-trained male sport science students (mean \pm SD: age, 23.3 \pm 2.0 years; body mass, 79.3 \pm 5.5 kg; height, 178.8 \pm 4.7 cm) volunteered to participate in this study. No physical limitations, health problems, or musculoskeletal injuries that could affect testing or training were found after a medical examination. None of them declared the use of drugs, medications, or dietary supplements known to influence physical performance. All subjects were informed of the benefits and risks of the investigation before signing an institutionally approved informed consent document to participate in the study. The study protocol adhered to the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki) and was approved by the ethics committee of the Catholic University of San Antonio.



Procedures

The full study protocol was composed of 7 sessions: 1 initial test session and 6 different protocol sessions. The warm-up and the procedure used to determine the 10RM load were identical for all subjects in all sessions. Subjects performed a 10-minutes standardized warm-up that included jogging, joint mobility exercises, 2 sets of 8 repetitions in the unloaded squat, 5 progressive CMJs, and 2 sprints of 20 m. Once the warm-up was completed, a progressive loading test in the full squat exercise was performed until the load

produced an MPV of $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ($\approx 10\text{RM}$ load according to Sánchez-Medina and González-Badillo) (32). The initial external load was set at 40 kg for all subjects and was progressively increased by 20 kg when the MPV was higher than $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10 kg when the MPV was between 1 and $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and from 5 to 1 kg when the MPV was below $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Four repetitions were performed when the MPV was above $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 2 repetitions when the MPV was between 1 and $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and only 1 repetition when the MPV was below $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The recovery period between

TABLE 1. Two-way repeated-measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2, and 3) and repetitions (1–10) on movement velocity during each set configuration.*†

Protocol	Set			Repetition			Interaction		
	F	p	η^2	F	p	η^2	F	p	η^2
TR1	12.7	0.001	0.613	227.3	<0.001	0.966	1.0	0.416	0.115
TR2	117.1	<0.001	0.936	44.6	<0.001	0.848	3.2	0.025	0.285
CL1	1.4	0.284	0.146	12.3	<0.001	0.606	0.6	0.903	0.069
CL2	22.8	<0.001	0.740	4.7	<0.001	0.372	0.7	0.813	0.080
CL3	6.6	0.008	0.454	3.9	<0.001	0.326	1.0	0.472	0.110
CL4				7.7	<0.001	0.489			

*F = Snedecor's F distribution; p = p value; η^2 = partial eta squared.
 †Sets \times repetitions (interrepetition rest): TR1 = 3×10 (0 seconds); TR2 = 6×5 (0 seconds); CL1 = 3×10 (10 seconds); CL2 = 3×10 (15 seconds); CL3 = 3×10 (30 seconds); CL4 = 1×30 (15 seconds).

Cluster Training and Acute Responses

TABLE 2. Comparison of velocity loss (%) among the different set configurations.*†

	Repetition 5	Repetition 10	Repetition 15	Repetition 20	Repetition 25	Repetition 30
ANOVA	$F = 6.3$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.441$	$F = 61.6$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.885$	$F = 11.8$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.596$	$F = 70.9$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.899$	$F = 6.2$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.436$	$F = 70.2$ $p < 0.001$ $\eta^2 = 0.898$
TR1 (%)	12.8 ± 10.9 [†] **	51.6 ± 4.5 [§] [†] ***	20.0 ± 6.9 †#**	55.2 ± 3.4 [§] [†] ***	23.4 ± 10.4 †#	56.6 ± 4.7 [§] [†] ***
TR2 (%)	13.5 ± 6.5 [†] ***	16.0 ± 5.0 [†] †#	17.4 ± 6.3 †#**	18.4 ± 8.3 [†] †#	20.6 ± 9.3 †#	21.1 ± 7.9 [†] [†] †#
CL1 (%)	9.1 ± 7.1 [†] **	12.8 ± 8.1 [†] #	10.4 ± 7.1 [†] §†	14.1 ± 7.0 [†] ‡	11.6 ± 8.3 [†] §**	14.7 ± 9.2 [†] §
CL2 (%)	0.0 ± 9.6 [†] §	4.8 ± 13.5 [†] §	3.5 ± 8.8 [†] § **	8.4 ± 12.3 [†] §	9.9 ± 9.8 [†] §**	12.8 ± 8.5 [†] §**
CL3 (%)	2.4 ± 5.1 [†] §	3.0 ± 3.1 [†] §**	5.8 ± 6.1 [†] §**	7.6 ± 5.8 [†] §**	7.4 ± 7.7 [†] §**	7.9 ± 6.1 [†] §**
CL4 (%)	2.2 ± 3.4 [†] §	8.5 ± 4.6 [†] §	12.9 ± 3.9 [†] §†#	15.0 ± 4.9 [†] §	18.8 ± 5.8 †#	21.5 ± 6.3 [†] †#

* $F =$ Snedecor's F distribution; $p = p$ value; $\eta^2 =$ partial eta squared.
†Sets \times repetitions (interrepetition rest): TR1 = 3 \times 10 (0 seconds); TR2 = 6 \times 5 (0 seconds); CL1 = 3 \times 10 (10 seconds); CL2 = 3 \times 10 (15 seconds); CL3 = 3 \times 10 (30 seconds); CL4 = 1 \times 30 (15 seconds).
‡Significantly different than TR1.
§Significantly different from TR2.
||Significantly different from CL1.
†Significantly different from CL2.
#Significantly different from CL3.
**Significantly different from CL4.

sets was 3 minutes. A linear encoder (Chronojump, Barcelona, Spain) was used to measure the velocity of the bar. Once the load linked to an MPV of 0.75 m·s⁻¹ was obtained, the subjects rested for 5 minutes, and then, this load was lifted as many times as possible to determine whether this load was close to the 10RM or if a slight increment or decrement in the magnitude of the load was needed. This test was considered to be properly performed when the last repetition was lifted at an MPV lower than 0.35 m·s⁻¹ (32).

Set Configurations. Subjects performed the 6 different set configurations in a counterbalanced randomized order over 3 consecutive weeks (2 sessions per week separated by 48–72 hours). Two traditional set configurations (TR; no rest between repetitions) and 4 cluster set configurations (CL; a rest period was introduced between successive repetitions) were analyzed in the present study:

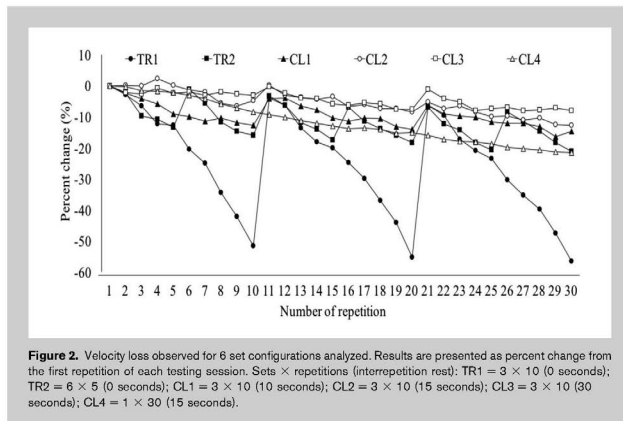
- TR1: 3 sets of repetitions to muscle failure with the 10RM load with no rest between repetitions.
- TR2: 6 sets of 5 repetitions with no rest between repetitions.
- CL1: 3 sets of 10 repetitions with 10 seconds of rest between each repetition.
- CL2: 3 sets of 10 repetitions with 15 seconds of rest between each repetition.
- CL3: 3 sets of 10 repetitions with 30 seconds of rest between each repetition.
- CL4: 1 set of 30 repetitions with 15 seconds of rest between each repetition.

The 2 traditional set configurations differed in the level of effort (TR1: repetitions to muscle failure; TR2: half the maximum possible number of repetitions per set). The only

difference between CL1, CL2, and CL3 was the duration of the rest period between repetitions. Finally, CL4 used the same interrepetition rest period as CL2 (15 seconds) but all the volume (i.e., 30 repetitions) was performed in only 1 set, thus reducing the session duration. The intersert rest (5 minutes) and the resistance applied (10RM) was the same for the 6 set configurations. The 10RM load was adjusted in each testing session to account for possible training effects (32).

The full squat exercise was chosen because it is one of the most effective exercises that can be used to enhance lower-body muscular strength (35). The depth of the squat was performed until the crease of the hip descended below the knees. An elastic cord was used to ensure the correct depth in each repetition and monitored through the linear encoder. All testing sessions were conducted using a Smith machine (Technogym, Cesena, Italy) to ensure a vertical displacement of the bar. All sessions were carried out under the direct supervision of the primary author of this study, who verbally encouraged the subjects to perform all repetitions at the maximum possible velocity. Note that training at the maximum intended velocity induces greater training adaptations than deliberately slower velocity training (8). A timer was used to monitor the duration of the rest periods in the 4 CL protocols. Subjects were instructed to keep their feet on the floor during the interrepetition rest periods to avoid differences in execution technique between repetitions.

Measures of Fatigue: Movement Velocity. The reduction in the velocity of the bar was used as a measure of mechanical fatigue (32). The MPV of the bar during the 30 repetitions performed with each set configuration was recorded using



set configuration (1 set was performed). At each measurement, 3 maximum CMJs separated by 5 seconds were performed, and the trial with the highest jump height was used for further analyses. Jump height was calculated with a contact platform (Chrono-jump) to the nearest of 0.1 cm from flight time measurements.

Blood Lactate Concentration. Blood lactate concentration was used as a measure of metabolic fatigue. Blood lactate measurements were obtained from the fingertip 30 seconds after the completion of each set. Therefore, 3 measurements were taken in the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations

a linear encoder with a sampling rate of 1,000 Hz via a 3-m cable. The software automatically distinguished the eccentric and concentric phases of the full squat exercise. The MPV was subsequently calculated by the software as the average velocity from the first positive velocity until the velocity of the bar became lower than gravity (33).

Countermovement Jump Height. The reductions in CMJ height observed after each training set and after the whole training session were also used as mechanical measures of fatigue (20). Countermovement height was measured at 7 time points during the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations (3 sets were performed); 13 times in the TR2 set configuration (6 sets were performed); and 3 times in the CL4

(3 sets were performed), 6 measurements in the TR2 set configuration (6 sets were performed), and only 1 measurement in the CL4 set configuration (1 set was performed). A portable lactate analyzer (Lactate Scout; SensLab GmbH, Leipzig, Germany) was used for lactate measurements. The lactate analyzer was calibrated before each exercise session according to the manufacturer's specifications.

Perceived Exertion. The OMNI-Resistance Exercise Scale (OMNI-RES) of perceived exertion was used as a measure of perceptual fatigue (29). Subjects were familiarized with the OMNI-RES scale during the familiarization session following the procedure described by Robertson et al. (29).

TABLE 3. Two-way repeated-measures ANOVAs examining the effect of the number of sets (1, 2, and 3) and the time of measurement (preset and postset) on countermovement jump height.*†

Protocol	Set			Time			Interaction		
	F	p	η ²	F	p	η ²	F	p	η ²
TR1	40.9	<0.001	0.836	87.8	<0.001	0.917	2.6	0.102	0.248
TR2	13.2	<0.001	0.622	48.0	<0.001	0.857	0.6	0.673	0.074
CL1	2.8	0.094	0.256	21.3	0.002	0.727	0.3	0.723	0.040
CL2	7.4	0.005	0.480	53.9	<0.001	0.871	0.9	0.431	0.100
CL3	29.8	<0.001	0.788	90.6	<0.001	0.919	0.0	0.985	0.002
CL4				21.9	0.002	0.732			

*F = Snedecor's F distribution; p = p value; η² = partial eta squared.
 †Sets × repetitions (interrepetition rest): TR1 = 3 × 10 (0 seconds); TR2 = 6 × 5 (0 seconds); CL1 = 3 × 10 (10 seconds); CL2 = 3 × 10 (15 seconds); CL3 = 3 × 10 (30 seconds); CL4 = 1 × 30 (15 seconds).

Cluster Training and Acute Responses

Specifically, after performing different protocol and immediately after finishing each set, the subjects gave their rating of perceived exertion using the OMNI-RES scale (0–10), where 0 is extremely easy and 10 represents extremely hard. An image of the OMNI-RES scale was shown to the subjects immediately after completing each set. Thus, the OMNI-RES scale was used on 3 occasions during the TR1, CL1, CL2, and CL3 set configurations (3 sets were performed), 6 times in the TR2 set configuration (6 sets were performed), and only once in the CL4 set configuration (1 set was performed).

Statistical Analyses

Data are presented as mean \pm SD. The normal distribution of the data was confirmed by the Shapiro-Wilk test ($p > 0.05$). The homogeneity of variances was assessed using Mauchly's sphericity test, and the Greenhouse-Geisser correction was applied when the assumption of homogeneity of variances was violated. One-way repeated-measures analyses of variance (ANOVAs) were conducted on the velocity attained at the first repetition of each set configuration and on the CMJ height reached at the beginning of each testing session to examine possible differences in physical readiness among the 6 set configurations. The differences in mechanical, metabolic, and perceptual responses among the 6 set configurations were also examined through repeated-measures ANOVAs. When significant F values were obtained, pairwise differences between means were tested using least significant difference post hoc procedures. Eta squared (η_p^2) was calculated for the ANOVAs where the values of the effect sizes 0.01, 0.06, and above 0.14 were considered small, medium, and large, respectively (2).

Statistical tests were performed using the software package SPSS (version 22.0; SPSS, Inc., Chicago, IL, USA). Significance was set at $p \leq 0.05$.

RESULTS

The ANOVAs conducted on the velocity attained at the first repetition of each set configuration ($F = 2.2$; $p = 0.070$; $\eta_p^2 = 0.218$) and the CMJ height reached at the beginning of each testing session ($F = 1.5$; $p = 0.213$; $\eta_p^2 = 0.158$) were not statistically significant. The average CMJ height obtained at the beginning of each testing session was 37.7 ± 6.7 cm. The average MPV attained at the first repetition of the 6 testing sessions with the 10RM load (80.4 ± 13.1 kg) was 0.76 ± 0.03 m \cdot s $^{-1}$.

Mechanical Responses

Movement Velocity. The ANOVA conducted on each set configuration generally revealed main effects for set (MPV decreased with the number of sets; the only exception in which the main effect set was not significant was for the CL1 protocol) and repetition (MPV decreased with the number of repetitions), but their interaction only reached statistical significance for TR2 (Table 1). The magnitude of the velocity

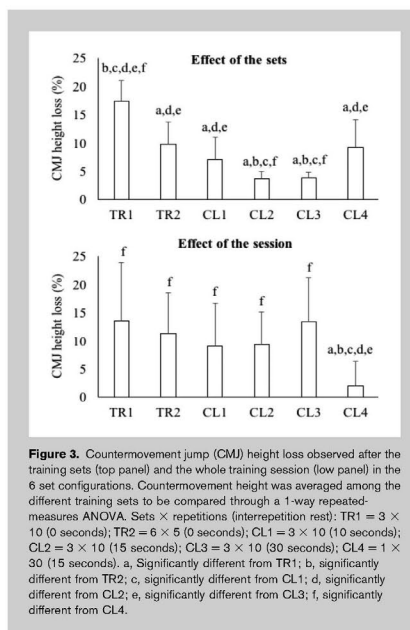
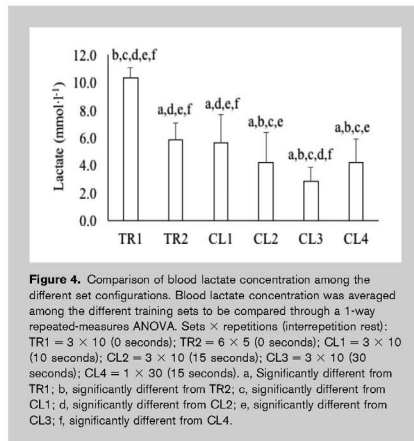


Figure 3. Countermovement jump (CMJ) height loss observed after the training sets (top panel) and the whole training session (low panel) in the 6 set configurations. Countermovement height was averaged among the different training sets to be compared through a 1-way repeated-measures ANOVA. Sets \times repetitions (interrepetition rest): TR1 = 3×10 (0 seconds); TR2 = 6×5 (0 seconds); CL1 = 3×10 (10 seconds); CL2 = 3×10 (15 seconds); CL3 = 3×10 (30 seconds); CL4 = 1×30 (15 seconds). a, Significantly different from TR1; b, significantly different from TR2; c, significantly different from CL1; d, significantly different from CL2; e, significantly different from CL3; f, significantly different from CL4.

loss (%) observed within the training session differed between set configurations (Figure 2). The velocity loss at repetitions 5, 10, 15, 20, 25, and 30 of the training session significantly differed between the set configurations (Table 2), with CL2 and CL3 being the protocols that were able to maintain higher velocities than the other set configurations. No significant differences in velocity loss were observed between CL2 and CL3.

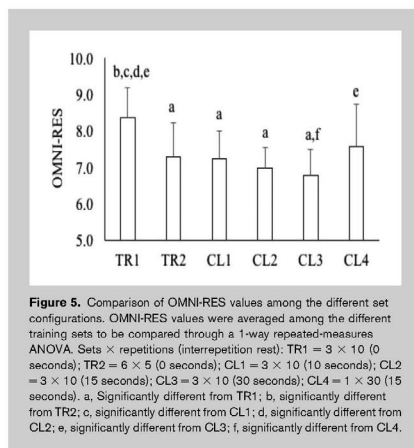
Countermovement Jump Height. Regardless of the set configuration analyzed, significant main effects for set (CMJ height decreased with the number of sets; the only exception in which the main effect set was not significant was for the CL1 protocol) and time (lower CMJ height after the fatigue protocol) were observed; however, their interactions did not show statistically significant differences (Table 3). The percent change of the CMJ height after the different sets performed in a session were averaged and then compared with the other set configurations via a 1-way ANOVA of repeated measures ($F = 23.2$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.743$). The magnitude of CMJ height loss after each set was TR1 $>$ TR2, and CL1 and CL4 $>$ CL2 and CL3 (Figure 3). Finally, the ANOVA conducted to evaluate the effect of the whole training session on the percent change of CMJ height revealed significant



differences between set configurations ($F = 3.6$; $p = 0.009$; $\eta_p^2 = 0.308$). The reduction in CMJ height was significantly lower in the CL4 protocol when compared with TR1, TR2, CL2, and CL3 (Figure 3).

Metabolic Responses

The ANOVA that compared blood lactate concentrations between the training sets was only significant for TR1 ($F = 107.3$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.931$). Blood lactate concentration significantly increased with the number of sets (set 1 = $8.5 \pm$



$0.8 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$; set 2 = $10.6 \pm 0.9 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$; set 3 = $11.8 \pm 0.9 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$).

Blood lactate concentration significantly differed between the set configurations ($F = 46.4$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.853$). Post hoc comparisons revealed that the set configurations could be ranked as follows: TR1 > TR2 and CL1 > CL2, and CL4 > CL3 (Figure 4).

Perceptual Responses

Values of OMNI-RES scale significantly differed between training sets for all set configurations (TR1: $F = 41.4$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.838$; TR2: $F = 18.5$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.698$; CL1: $F = 25.1$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.758$; CL2: $F = 6.8$; $p = 0.028$; $\eta_p^2 = 0.460$; and CL3: $F = 5.5$; $p = 0.042$; $\eta_p^2 = 0.407$). Post hoc comparisons revealed that OMNI-RES values increased with the number of sets.

Values of OMNI-RES were averaged over the different sets in each session and then compared with a 1-way ANOVA for repeated measures ($F = 6.8$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.461$). The post hoc comparisons revealed significant differences between set configurations as follows: TR1 > CL4 > TR2, CL1, CL2, and CL3 (Figure 5).

DISCUSSION

In the present study, we explored the effect of different set configurations on mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue during multiple sets in the full squat exercise performed with the 10RM load. Our main findings are as follows: (a) the CL2 and CL3 set configurations (15 and 30 seconds of interrepetition rest, respectively) were able to maintain greater velocities during the training; (b) although CL2 and CL3 were also the set configurations that produced lower CMJ height loss after each training set, the CL4 (i.e., 1 set of 30 repetitions with 15 seconds of interrepetition rest) was the set configuration that induced a lower CMJ height loss after the whole training session; (c) longer interrepetition rest periods were associated with lower lactate concentrations; and (d) CL4 and especially TR1 were the 2 set configurations associated with greater perceptual fatigue. These results indicate that for a training session with the same volume (30 repetitions) and relative load (10RM), the implementation of different cluster configurations is effective in influencing mechanical, metabolic, and perceptual responses.

Regardless of the set configuration, the number of sets and repetitions were associated with a reduction in MPV. However, the magnitude of velocity loss differed between different set configurations. When compared with the most commonly applied set configuration (i.e., TR1: repetitions performed until muscular failure), all the remaining set configurations, and especially CL2 and CL3, were able to maintain higher values of MPV throughout the session. These results are in agreement with previous studies that have shown that the magnitude of velocity loss can be considerably attenuated by reducing the level of effort of the

Cluster Training and Acute Responses

training set (27,32) and by introducing brief rest periods between successive repetitions (3,4,12,13,16,40). In line with Hardee et al. (16), who reported similar values of power output in the power clean exercise when 20 and 40 seconds of interrepetition rest were implemented, our results indicate that CL2 (15 seconds of interrepetition rest) and CL3 (30 seconds of interrepetition rest) set configurations are equally effective in maintaining MPV within the training session. It should be noted that 15 seconds of interrepetition rest could be preferable to 30 seconds because it markedly reduces training session durations.

We also observed a reduction in CMJ height as a consequence of the increment in the number of sets and after the performance of each training set. In line with the results obtained for MPV, the greatest CMJ height loss was obtained after TR1, although CL2 and CL3 showed the lowest reduction in CMJ height immediately after completing each training set. These results further support the use of CMJ height loss to quantify neuromuscular fatigue (20,24,32). Surprisingly, the lowest reduction in CMJ height after the completion of the training session was observed after CL4 (i.e., 1 set of 30 repetitions with 15 seconds of interrepetition rest). Although speculative, we suggest the possible influence of a postactivation potentiation (PAP) phenomenon that counteracted the negative influence of fatigue during recovery, thus minimizing the CMJ height loss after CL4 (1). Further studies should evaluate the influence of different set configurations on the PAP-fatigue balance at different time points during recovery for better design of complex training sessions.

The effect of the number of sets on blood lactate concentration was different than that observed with regard to mechanical responses. The performance of successive sets induced an increment in blood lactate concentration after TR1, but no significant changes were observed after the remaining set configurations. This result indicates that 5 minutes of interset rest was enough to minimize metabolic stress between successive sets in all the set configurations analyzed, with the exception of TR1. In agreement with previous studies, the inclusion of longer rest periods between repetitions was associated with lower lactate concentrations (5,18). It should be noted that metabolic stress is deemed one of the main mechanisms responsible for muscle hypertrophy (36); consequently, the lower metabolic stress induced by cluster set configurations could be detrimental to the induction of hypertrophic adaptations (5,26). In this regard, CL2 (15 seconds of interrepetition rest) may be preferable to CL3 (30 seconds of interrepetition rest) because it induced greater metabolic stress but similar mechanical performance. Further studies should verify whether differences in acute metabolic responses are related to different hypertrophy levels in the long term with different set configurations.

Finally, in agreement with the results obtained for the mechanical variables, the number of sets was associated with an increase in perceived fatigue (i.e., higher OMNI-RES

values) in all the set configurations analyzed. As expected, TR1 was associated with the highest perceptual fatigue. However, contrary to the results obtained from both mechanical and metabolic variables, CL4 was the second most perceptually fatiguing set configuration, although no differences were observed between the other 4 set configurations (TR2, CL1, CL2, and CL3). Although the higher perceived fatigue in TR1 and CL4 could be attributed to their shorter training sessions (11.5 and 8.75 minutes, respectively; Figure 1), previous studies have also shown that cluster set configurations induce lower perceived fatigue when the total session duration is equalized with respect to traditional continuous repetition training (23). Overall, these results confirm the usefulness of different cluster set configurations when the objective is to reduce the perceived degree of effort (15,23). However, although it was effective in terms of low levels of mechanical and metabolic fatigue, CL4 (a set of 30 repetitions with 15 seconds of interrepetition rest) may not be suitable for novice subjects because it was perceived as very stressful compared with other cluster set configurations.

One strength of the present study was that the 10RM load was adjusted on a per session basis. This decision was justified as a training-related effect that would be expected to be induced by the successive testing sessions, in addition to the inherent differences in physical readiness that may occur on a daily basis (6,32). The nonsignificant differences in the MPV attained at the first repetition in each testing session show that the relative load was similar for all 6 set configurations (9). In addition, the absence of significant differences in the CMJ height achieved at the beginning of each session indicates that the physical readiness of the subjects was similar in all of them. Cluster training studies have used protocols with brief rest periods introduced between individual repetitions (4,16) or group of repetitions (22,27). Although, in the present study, we explored the effect of introducing brief rest periods between single repetitions, future studies should explore the effect of introducing rest periods after groups of 2 or 3 continuous repetitions.

In conclusion, all cluster set configurations proved to reduce the mechanical, metabolic, and perceptual measures of fatigue observed during multiple sets in the full squat exercise performed against the 10RM load. All the cluster set configurations evaluated in the present study allowed the maintenance of greater MPV when compared with the traditional set configuration.

PRACTICAL APPLICATIONS

Based on the results of the present study, CL2 (15 seconds of interrepetition rest) and CL3 (30 seconds of interrepetition rest) were the 2 set configurations that minimized mechanical fatigue (movement velocity and CMJ height loss). Additionally, perceptual fatigue did not differ between CL2 and CL3. Therefore, because CL2 reduces training session durations and promotes similar metabolic stress, we would

recommend the application of 15 seconds of interrepetition rest over the rest of the cluster set configurations evaluated in the present study.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are very grateful to the subjects who participated in this study for their involvement. The authors sincerely thank Raul Andrés López and Antonio García-Peñuela for their participation in the measurement sessions and valuable participation during the process. They also thank Dr. David G. Behm for the English revision of the manuscript. The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

REFERENCES

- Boullousa, DA, Abreu, L, Beltrame, LG, and Behm, DG. The acute effect of different half squat set configurations on jump potentiation. *J Strength Cond Res* 27: 2059–2066, 2013.
- Cohen, J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. *J Am Stat Assoc* 84: 19–74, 1988.
- García-Ramos, A, Nebot, V, Padiál, P, Valverde-Esteve, T, Pablos-Monzó, A, and Feriche, B. Effects of short inter-repetition rest periods on power output losses during the half squat exercise. *Isokinet Exerc Sci* 24: 323–330, 2016.
- García-Ramos, A, Padiál, P, Haff, GG, Argüelles-Cienfuegos, J, García-Ramos, M, Conde-Pipó, J, and Feriche, B. Effect of different interrepetition rest periods on barbell velocity loss during the ballistic bench press exercise. *J Strength Cond Res* 29: 2388–2396, 2015.
- Girman, JC, Jones, MT, Matthews, TD, and Wood, RJ. Acute effects of a cluster-set protocol on hormonal, metabolic and performance measures in resistance-trained males. *Eur J Sport Sci* 14: 151–159, 2014.
- González-Badillo, J, Yañez-García, J, Mora-Custodio, R, and Rodríguez-Rosell, D. Velocity loss as a variable for monitoring resistance exercise. *Int J Sports Med* 38: 217–225, 2017.
- González-Badillo, JJ, Marques, MC, and Sánchez-Medina, L. The importance of movement velocity as a measure to control resistance training intensity. *J Hum Kinet* 29: 15–19, 2011.
- González-Badillo, JJ, Rodríguez Rosell, D, Sánchez Medina, L, Gorostiaga, EM, and Pareja-Blanco, F. Maximal intended velocity training induces greater gains in bench press performance than deliberately slower half-velocity training. *Eur J Sport Sci* 18: 772–781, 2014.
- González-Badillo, JJ and Sánchez-Medina, L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med* 31: 347–352, 2010.
- Gorostiaga, EM, Navarro-Amézqueta, I, Calbet, JA, Sánchez-Medina, L, Cusso, R, Guerrero, M, and et al. Blood ammonia and lactate as markers of muscle metabolites during leg press exercise. *J Strength Cond Res* 28: 2775–2785, 2014.
- Haff, GG, Hobbs, RT, Haff, EE, Sands, WA, Pierce, KC, and Stone, MH. Cluster training: A novel method for introducing training program variation. *Strength Cond J* 30: 67–76, 2008.
- Haff, GG, Whitley, A, McCoy, LB, O'Bryant, HS, Kilgore, JL, Haff, EE, Pierce, K, and Stone, MY. Effects of different set configurations on barbell velocity and displacement during a clean pull. *J Strength Cond Res* 17: 95–103, 2003.
- Hansen, KT, Cronin, JB, and Newton, MJ. The effect of cluster loading on force, velocity, and power during ballistic jump squat training. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 455–468, 2011.
- Hansen, KT, Cronin, JB, Pickering, SL, and Newton, MJ. Does cluster loading enhance lower body power development in pre-season preparation of elite rugby union players? *J Strength Cond Res* 25: 2118–2126, 2011.
- Hardee, JP, Lawrence, MM, Utter, AC, Triplett, NT, Zwetsloot, KA, and McBride, JM. Effect of inter-repetition rest on ratings of perceived exertion during multiple sets of the power clean. *Eur J Appl Physiol* 112: 3141–3147, 2012.
- Hardee, JP, Travis Triplett, N, Utter, AC, Zwetsloot, KA, and McBride, JM. Effect of interrepetition rest on power output in the power clean. *J Strength Cond Res* 26: 883–889, 2012.
- Iglesias-Soler, E, Carballeira, E, Sánchez-Otero, T, Mayo, X, and Fernández-Del-Olmo, M. Performance of maximum number of repetitions with cluster-set configuration. *Int J Sports Physiol Perform* 9: 637–642, 2014.
- Iglesias-Soler, E, Carballeira, E, Sánchez-Otero, T, Mayo, X, Jiménez, A, and Chapman, ML. Acute effects of distribution of rest between repetitions. *Int J Sports Med* 33: 351–358, 2012.
- Izquierdo, M, Ibañez, J, González-Badillo, JJ, Häkkinen, K, Ratamess, NA, Kraemer, WJ, French, DN, Esclava, J, Altadill, A, Asian, X, and Gorostiaga, EM. Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *J Appl Physiol* 100: 1647–1656, 2006.
- Jimenez-Reyes, P, Pareja-Blanco, F, Cuadrado-Penafiel, V, Morcillo, JA, Parraga, JA, and Gonzalez-Badillo, JJ. Mechanical, metabolic and perceptual response during sprint training. *Int J Sports Med* 37: 807–812, 2016.
- Latham, NK, Bennett, DA, Stretton, CM, and Anderson, CS. Systematic review of progressive resistance strength training in older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 59: 48–61, 2004.
- Lawton, TW, Cronin, JB, and Lindsell, RP. Effect of interrepetition rest intervals on weight training repetition power output. *J Strength Cond Res* 20: 172–176, 2006.
- Mayo, X, Iglesias-Soler, E, and Fernández-Del-Olmo, M. Effects of set configuration of resistance exercise on perceived exertion. *Percept Mot Skills* 119: 825–837, 2014.
- Morcillo, JA, Jiménez-Reyes, P, Cuadrado-Penafiel, V, Lozano, E, Ortega-Becerra, M, and Parraga, J. Relationships between repeated sprint ability, mechanical parameters, and blood metabolites in professional soccer players. *J Strength Cond Res* 29: 1673–1682, 2015.
- Naclerio, F and Larumbe-Zabala, E. Relative load prediction by velocity and the Omni-Res 0–10 scale in parallel squat. *J Strength Cond Res* 31: 1585–1591, 2017.
- Oliver, JM, Kreutzer, A, Jenke, S, Phillips, MD, Mitchell, JB, and Jones, MT. Acute response to cluster sets in trained and untrained men. *Eur J Appl Physiol* 115: 2383–2393, 2015.
- Oliver, JM, Kreutzer, A, Jenke, SC, Phillips, MD, Mitchell, JB, and Jones, MT. Velocity drives greater power observed during back squat using cluster sets. *J Strength Cond Res* 30: 235–243, 2016.
- Rhea, MR, Alvar, BA, Burkett, LN, and Ball, SD. A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Med Sci Sport Exerc* 35: 456–464, 2003.
- Robertson, RJ, Goss, FL, Rutkowski, J, Lenz, B, Dixon, C, Timmer, J, Frazee, K, Dube, J, and Andreacci, J. Concurrent validation of the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc* 35: 333–341, 2003.
- Ruiz, JR, Sui, X, Lobelo, F, Morrow, JR Jr, Jackson, AW, Sjostrom, M, and Blair, SN. Association between muscular strength and mortality in men: Prospective cohort study. *BMJ* 337: a439, 2008.
- Sampson, JA and Groeller, H. Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scand J Med Sci Sport* 26: 375–383, 2016.
- Sánchez-Medina, L and González-Badillo, JJ. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1725–1734, 2011.

Cluster Training and Acute Responses

33. Sanchez-Medina, L, Perez, CE, and Gonzalez-Badillo, JJ. Importance of the propulsive phase in strength assessment. *Int J Sports Med* 31: 123-129, 2010.
34. Schoenfeld, B, Ogborn, D, and Krieger, J. Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci* 35: 1073-1082, 2017.
35. Schoenfeld, BJ. Squatting kinematics and kinetics and their application to exercise performance. *J Strength Cond Res* 24: 3497-3506, 2010.
36. Schoenfeld, BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sport Med* 43: 179-194, 2013.
37. Spiering, BA, Kraemer, WJ, Anderson, JM, Armstrong, LE, Nindl, BC, Volek, JS, and Maresh, CM. Resistance exercise biology: Manipulation of resistance exercise programme variables determines the responses of cellular and molecular signalling pathways. *Sport Med* 38: 527-540, 2008.
38. Suchomel, TJ, Nimphius, S, and Stone, MH. The importance of muscular strength in athletic performance. *Sport Med* 46: 1419-1449, 2016.
39. Tufano, JJ, Brown, LE, and Haff, GG. Theoretical and practical aspects of different cluster set structures: A systematic review. *J Strength Cond Res* 31: 848-867, 2017.
40. Tufano, JJ, Conlon, JA, Nimphius, S, Brown, LE, Seitz, LB, Williamson, BD, and Haff, GG. Cluster sets maintain velocity and power during high-volume back squats. *Int J Sports Physiol Perform* 11: 86-95, 2016.
41. Zourdos, MC, Klemp, A, Dolan, C, Quiles, JM, Schau, KA, Jo, E, Helms, E, Esagro, B, Duncan, S, Garcia Merino, S, and Blanco, R. Novel resistance training-specific RPE scale measuring repetitions in reserve. *J Strength Cond Res* 30: 267-275, 2016.

■ Estudio II



antioxidants



Article

Influence of Sampling Conditions, Salivary Flow, and Total Protein Content in Uric Acid Measurements in Saliva

Jorge M. González-Hernández ^{1,2,*}, Lorena Franco ^{3,†}, David Colomer-Poveda ¹,
Silvia Martínez-Subiela ³, Ramón Cugat ⁴, José J. Cerón ³, Gonzalo Márquez ¹,
Luis M. Martínez-Aranda ¹, Pedro Jiménez-Reyes ⁵ and Asta Tvarijonavičiute ³

¹ Neuromove Research Group, Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio (UCAM), Campus de los Jerónimos, 30107 Murcia, Spain; dcolomer@ucam.edu (D.C.-P.); gmarquez@ucam.edu (G.M.); lmmartinez2@ucam.edu (L.M.M.-A.)

² Faculty of Health Science, Universidad Europea de Canarias, la Orotava, 38300 Tenerife, Spain

³ Interdisciplinary Laboratory of Clinical Analysis, University of Murcia, 30100 Murcia, Spain; lorena.franco2@um.es (L.F.); silviam@um.es (S.M.-S.); jjceron@um.es (J.J.C.); asta@um.es (A.T.)

⁴ Garcia Cugat Foundation, 08023 Barcelona, Spain; montse.garcia@sporttrauma.com

⁵ Centre for Sport Studies, Rey Juan Carlos University, Fuenlabrada, 28943 Madrid, Spain; Peterjr49@hotmail.com

* Correspondence: jormigohe91@gmail.com

† These authors contributed equally to this work.

Received: 26 July 2019; Accepted: 6 September 2019; Published: 11 September 2019



Abstract: Uric acid (UA) is the most abundant antioxidant compound in saliva and one of the most sensitive biomarkers for detecting changes in the oxidative status of the organism. The aim of this study was to evaluate the effect of: (i) different methods of saliva sampling and (ii) the correction by salivary flow or total protein on UA concentrations in saliva. Paired saliva (collected by two different methods, passive drooling and using Salivette cotton rolls) and serum samples were obtained from 12 healthy men after the performance of two resistance training exercises of different level of effort that can produce different concentrations in UA in saliva. There were no significant differences between values of uric acid in saliva using Salivette and passive drool. Correlations between UA in serum and saliva and increases in UA in saliva after exercise were detected when saliva samples were obtained by passive drool and Salivette and were not corrected by salivary flow or total protein concentration. Therefore for UA measurements in saliva it would not be recommended to normalize the results by salivary flow or protein concentration. This study highlights the importance of choosing an adequate sampling method selection as well as the expression of results when analytes are measured in saliva.

Keywords: squat; salivettes; biomarkers; oxidative stress

1. Introduction

Saliva, as a sample where different biomarkers which can be easily measured, has attracted attention of the scientific community in recent years. The easy and painless collection are the main advantages of using saliva compared to serum use. In addition, it is a non-invasive procedure allowing its use in field conditions and repeated sampling [1], producing minimum discomfort and anxiety.

Saliva has an antioxidant system consisting of various metabolites and enzymes [2]. For this reason, saliva has been used to investigate possible changes in the oxidative status associated with different conditions, such as oral diseases [3,4], systemic diseases (e.g., diabetes [5] or renal failure [6]), and physical efforts [7]. Uric acid (UA) is the most important antioxidant molecule in saliva, contributing

around 70% of the total salivary antioxidant capacity [8] and being able to chelate transition metals and to react with biological oxidants such as hydroxyl radicals, hypochlorous acid, and reactive nitrogen species [9]. In a previous report, UA was the only analyte showing a significant change when a panel of oxidative stress biomarkers was measured in saliva after an acute session of resistance exercise. Therefore, UA is one of the most important biomarkers that should be analyzed in saliva in order to evaluate oxidative stress [7].

One of the causes that can produce changes in oxidative status and increases in UA is resistance training (RT), which is a physical exercise modality allowing the modification of variables such as number of sets, repetitions, or rest time [7]. Training to failure (TF) is characterized by the inability to complete a concentric phase due to the high level of fatigue [10,11]. On the other hand, training consisting of a number of repetitions that are less than the achievable maximum is known as training not leading to failure (TNLF) and has been shown to produce less fatigue and similar or even better adaptations than TF [12].

The features of the device used for sampling, as well as the way the analytes are expressed in saliva, may influence the results. For example, Salivette cotton rolls significantly increase salivary testosterone and estradiol levels [13] and in the specific case of dehydroepiandrosterone, the cotton interference effect is of sufficient magnitude to attenuate the association between serum and saliva levels [14]. Furthermore, in some analytes, such as the salivary alpha-amylase (sAA), the use of normalized values by considering salivary flow or protein concentration can produce variability in the results of sAA in different stress models, compared with the results expressed without any correction [15]. Saliva has been collected for measuring levels of UA by different methods, such as flow stimulation by chewing on paraffin [2], using a cotton roll [16], or without stimulation [17]. However, there are no comparative studies about whether different sampling and normalization procedures might affect the UA values in saliva. Therefore, the main objective of this study was to evaluate how two different sampling conditions (using passive drool or Salivette with cotton) and three different normalization procedures (without any correction, corrected by salivary flow, or corrected by total protein concentration) could influence the measured values of UA in saliva. For this purpose, the effect of different sampling conditions and normalization procedures in saliva on UA concentrations, and their correlations with serum values, were evaluated in saliva samples that were obtained by two experimental models of acute exercise (TLF and TNLF) in order to get samples with different UA concentrations.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental Approach to the Problem

Two different squat resistance-training protocols were designed to obtain samples with different UA concentrations. Prior to the protocol performance, two familiarization sessions with saliva extraction and full squat technique training were performed, in addition to the 10 repetition maximum (10 RM) load determination [18]. First protocol included 6 sets of 10 repetitions (TF), while the second one included 6 sets of 5 repetitions (TNLF), both with 5 min of rest and the same external load corresponding to 10 repetition maximum (RM). Subjects performed two different protocols in a counterbalanced order during two consecutive weeks. Moreover, all training sessions were supervised by a strength and conditioning specialist, in order to ensure the correct performance of the exercise. On the other hand, saliva sampling was made by two different procedures, passive drool and Salivette cotton roll, both sampled for a 1 min duration. Saliva results were expressed without any correction, and corrected by salivary flow rate and total protein.

2.2. Subjects

Twelve trained males (age 23.5 ± 3.5 years, height 1.77 ± 0.10 m, and body mass 73 ± 7.2 kg), volunteered to participate in this study. The criteria of inclusion were the absence of any health problems or musculoskeletal injuries and also the absence of ingestion of any drug in the last six months.

Participants were fully informed of any possible risks and discomforts associated with experimental procedures and provided a written informed consent to participate in this study, which was approved by the local ethical committee in agreement (1349/2016) with the Declaration of Helsinki.

2.3. Procedures

Three training sessions were performed starting with a pre-test, followed by two post-tests days (24 and 48 h). First, baseline saliva and serum sample collections were carried out in fasting conditions. Afterwards, subjects had a breakfast (juice and a toast with tomato and olive oil). One hour later, they did a standardized warm-up protocol, followed by training sessions of 50–60 min (including warm-up) which were supervised by researchers specializing in strength and conditioning training. Every session was performed in the morning at the same schedule for each individual (± 1 h), under constant environmental conditions (20 °C and 60% humidity).

Saliva and blood were sampled at four different times. The first sample corresponding with the baseline was taken at 8:30 AM. The second saliva and blood samples were collected 60 min post-training. Finally, the third and fourth extraction corresponded with 24 and 48 h post-training. The order of collection was saliva by passive flow first, followed by collecting saliva using Salivette, and finally the blood sample was collected. Participants were not allowed to eat, drink coffee or caffeinated soft drinks, or consume dairy products one hour before collecting saliva samples. Furthermore, five minutes prior to saliva collection, participants were asked to rinse their mouth with clear water to avoid contaminations.

Specifically, saliva was collected by applying two different procedures (i) passive flow for 1 min under supervision, using 5 mL standard microcentrifuge polystyrene tubes with round bottoms (12 × 75 mm) (Deltalab, 5 mL, Barcelona, Spain) [15], (ii) Salivette cotton roll (Sarstedt, Nümbrecht, Germany). Salivette rolls were chewed for 1 min and then placed into special centrifugation tubes. Each sample was refrigerated or stored on ice until arrival to the laboratory, which was no longer than 45 min after sample collection. All the samples were firstly weighed and then centrifuged at 4500 × g for 10 min at 4 °C. The supernatant from whole saliva samples obtained by passive flow and saliva samples from the Salivettes were transferred to 1.5 mL Eppendorf tubes and stored at −80 °C until analysis. In all cases the volume of saliva obtained was 1 mL minimum.

After saliva collection, blood extractions were performed from the antecubital vein (5 mL) into one plane tube to get serum (approximately 2 mLs) that was stored at −80 °C until analysis.

UA was measured using a colorimetric commercial kit (Uric acid, Beckman Coulter Inc., Fullerton, CA, USA) following the International Federation of Clinical Chemistry (IFCC) method. This assay showed in saliva and serum less than 10% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution.

Salivary flow rate was obtained by dividing the saliva volume by the time of the sampling period (1 min) [15,19]. Saliva volume was obtained by subtracting the empty tube weight from the saliva-filled one, and values in grams obtained were considered equivalent to milliliters. UA amount was later multiplied by flow rate (mg/min).

Saliva total protein quantification (TP) expressed in mg/mL was done through a commercially available colorimetric kit for measuring urine and low-complexity region (LCR) proteins (protein in urine and CSE, Spinreact, Spain). This assay showed in saliva less than 15% inter and intra-assay imprecision and was linear in the linearity test under dilution. To express the values of UA normalized by protein content, in each sample the results from UA were divided by its total protein value (mg/mg).

2.4. Statistical Analyses

Data are presented as Mean (interquartile range). Data distribution was examined for normality using the D'Agostino and Pearson omnibus normality test. When data was not normally distributed, non-parametric tests were used. Uric acid values obtained in serum, and saliva using Salivette and passive droll methodologies, were compared using the Friedman test followed by Dunn's multiple

comparison test. Correlation between different variables were evaluated using the Spearman correlation test. Statistical analyses were performed using a computer software (Graph Pad Prism Version 7 for Windows, Graph Pad software, La Jolla, CA, USA). The level of significance was set at $p < 0.05$.

A post hoc power analysis was conducted using the values obtained to verify the null hypothesis. By using the mean and standard deviation of uric acid for basal time and after 60 minutes of exercise, and a power of 80% at a 5% level of significance, the number of individuals were calculated. The data analysis was done using ClinCalc statistic analyzer software (<https://clincalc.com/stats/sampleize.aspx>).

3. Results

The power analysis test indicates that 10 subjects were required in order to obtain a power of 80% with a 5% level of significance.

Results of UA concentrations in serum and saliva when collected with Salivette or by passive drool, corrected either by salivary flow rate, by total protein concentration, or without any correction are shown in Table 1.

A significant increase in serum values of UA was detected at 60 min ($p = 0.011$) and 24 h ($p = 0.009$) after the TF protocol. However, no significant changes in serum uric acid were detected at any time after the TNFL protocol, although there was a tendency to increase at 24 and 48 h.

In saliva, significant increases in UA concentration without any correction were found at 60 min after the TF protocol with the two tested sampling methods (Salivette, $p = 0.017$ and passive drool, $p = 0.021$). When values were corrected by salivary flow, an increase at 60 min was also found after the TF protocol with the same two sampling methods (Salivette, $p = 0.032$ and passive drool, $p = 0.01$). After correction by total protein, a decrease in the values of UA after TF was found.

After the TNLF protocol, UA concentrations increased in saliva at 60 min ($p = 0.011$) when using passive drool, but a decrease was noticed when the values were corrected by salivary flow rate. The Salivette method revealed an increase in UA at 48 h ($p = 0.026$), and this change was not observed when the results were corrected by flow or total protein concentration. Even after correction by total protein, a decrease in the values of UA after TF was found.

In Table 2 appears the comparison between uric acid values obtained in serum and in saliva using Salivette and passive drool. There were no significant differences between the values of uric acid in saliva using Salivette and passive drool.

Correlation analysis results are depicted in Table 3. Data analysis revealed a low but significant correlation between serum and saliva UA values obtained with Salivette methods and expressed without any correction ($r = 0.4344$; $p < 0.001$) and with saliva values obtained by passive drool and expressed without any correction ($r = 0.3728$; $p = 0.031$).

Table 1. Mean (interquartile range) data of serum and salivary uric acid (UA) before (Pre) and after 60 min (Post_60), 24 h (Post_24), and 48 h (Post_48) of acute exercise. TLF: training leading to failure, TNLF: training not leading to failure, TP: total proteins.

Sample Type	TLF (n = 10)			TNLF (n = 8)				
	Pre	Post_60	Post_24	Post_48	Pre	Post_60	Post_24	Post_48
Serum (mg/dL)	5.36 (4.98–6.61)	5.92 (4.85–6.99)*	5.97 (4.58–6.81)**	5.58 (4.34–6.18)	4.98 (4.19–6.28)	4.81 (4.23–6.14)	5.37 (4.27–6.16)	5.38 (3.97–5.92)
Salivary UA (mg/dL)	2.10 (1.76–3.11)	2.75 (2.25–3.55)*	2.28 (1.81–2.42)	2.17 (1.88–3.18)	1.78 (1.65–2.42)	1.97 (1.56–2.77)	1.99 (1.50–2.57)	2.19 (1.65–3.09)*
Salivary Flow Rate (mg/min)	4.16 (3.14–5.49)	4.58 (3.52–6.80)*	3.03 (2.42–5.13)	4.09 (2.92–6.71)	3.64 (3.14–4.66)	5.10 (3.10–6.62)**	3.15 (2.15–4.31)	3.89 (2.50–4.92)
Salivary TP (mg/dL)	5.80 (5.08–6.80)	3.65 (2.28–4.93)*	5.05 (3.15–6.98)	4.65 (3.40–5.85)	4.64 (4.98–8.89)	2.64 (1.91–4.64)**	4.67 (3.40–9.01)	5.47 (4.41–8.95)
Passive Drost (mg/dL)	2.47 (1.30–3.07)	2.77 (1.86–4.83)*	2.52 (1.48–2.84)	2.29 (0.96–2.51)	1.92 (1.02–2.69)	2.40 (1.27–2.95)*	1.86 (1.46–2.56)	1.73 (1.33–2.64)
Passive Drost x Flow Rate (mg/min)	2.54 (1.16–4.41)	4.51 (1.80–8.89)*	3.97 (1.58–4.14)	2.15 (0.90–3.81)	1.80 (1.24–3.02)	1.75 (1.21–4.03)	2.20 (1.37–3.78)	2.27 (1.27–3.56)
Passive Drost/TP (mg/min)	6.61 (3.37–8.58)	5.86 (3.16–9.15)	5.68 (2.86–10.40)	4.42 (2.31–16.6)	1.92 (1.02–2.69)	2.40 (1.27–2.95)*	1.86 (1.46–2.56)	1.73 (1.33–2.64)

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. Pre of the same group.

Table 2. Comparison between uric acid values obtained in serum and in saliva using Salivette and passive drool.

Analyte	Serum	Salivette	Passive Drool
Uric Acid, mg/dL	5.38 (4.25–6.36)	2.11 (1.67–2.76) *	2.17 (1.40–2.84) *

* $p < 0.001$ vs. levels in serum.**Table 3.** Correlation data between uric acid in serum and saliva.

Sample type	Spearman r	95% Confidence Interval	p Value
Salivette	0.4344	0.2506–0.5880	<0.001
Salivette Flow	0.1795	−0.02787–0.3720	0.080
Salivette/TP	0.1676	−0.04009–0.3614	0.102
Passive Drool	0.3728	0.07919–0.4605	0.031
Passive Drool Flow	0.3541	0.1131–0.4871	0.089
Passive Drool/TP	0.09	−0.3365–0.4859	0.170

4. Discussion

In this study we evaluated whether the sampling and normalization procedures may influence the results of UA in saliva. We used the RT model since it has been previously reported that this procedure of acute exercise increases UA in saliva [7]. The rationale for including two resistance exercise protocols of different intensities in this study is because we postulated that the different intensities could produce different values of UA in saliva. Therefore, with this design we were able to study how the procedures of saliva collection and normalization of values behave for a wide range of UA values.

We used a commercially available assay for the UA measurements in saliva since it was easy and cheap to obtain and set-up. This assay provided adequate results of imprecision and linearity under dilution when validated in saliva and serum, and did not require any modification for the salivary measurements compared to serum.

Our results showed that the TF protocol produced a significant increase in serum and saliva UA at 60 min post-training, being recovered after 48 h of exercise cessation. This is in agreement with a previous report [7], where authors reported salivary and serum UA increments 10 min after an acute bout of RT performed against 75% of one repetition maximum (10 reps \times 3 sets). In contrast, we did not observe any significant increase in serum after the TNLF protocol. The increase of UA after intense exercise could be due to an increased purine oxidation and subsequent UA production [16] but it could be also protective in terms of increased antioxidant capacity of the saliva. According to our results, it can be postulated that the exercise representing maximum effort (TF) leads to a significant and fast increase of UA in serum which tends to decrease after 24 h. However, a less fatiguing protocol (such as TNLF) seems to produce lower rates of oxidative stress. Overall, the TF model allowed us to evaluate our procedures of saliva collection and normalization with different UA values.

Concerning the sampling and normalization procedures, our results revealed that values of UA in saliva obtained with Salivette and passive drool and without any correction showed a moderate correlation with serum. These results are in agreement with the ones obtained in the previous reports where Salivette was used in 54 individuals with normal weight [16] and in study with 83 subjects where passive drool was used [20]. However, the correlation coefficient (r) that we obtained was lower than the one reported by Kondakova et al. [18] ($r = 0.76$). These differences could be related to different conditions of the assays used or the existence of a different dynamic in the UA response to exercise in serum than in saliva. Overall, it would be desirable to evaluate a larger population to assess the correlations between passive drool and Salivette and serum. In addition, in case of using other ways of obtaining saliva such as ascorbic acid stimulation, it would be of interest to evaluate its possible effect on UA, specially taking in consideration that ascorbic acid is an antioxidant agent.

The use of Salivette has been previously recommended in some studies since, by using the rolls and after centrifugation, the saliva contains less mucins and loses viscosity, making sample processing

easier [21]. However it can alter the composition of some analytes, and therefore the number of analytes that can be measured with this procedure is limited [13,22]. In our study no differences were found between the use of Salivette and passive drool in UA in saliva, so apparently both methods could be used for UA measurements.

Regarding the different normalization procedures used in this study, non-corrected UA values showed the highest correlation with serum. When the results were corrected by flow or total protein concentration, the changes on UA after exercise were generally not correlated to those obtained in serum. This is in agreement with a previous study where uncorrected values described more accurately the changes observed in saliva alpha-amylase under different experimental conditions [15]. Therefore, our results reinforce previous recommendations about not normalizing samples to protein concentration in saliva when assessing the level of physical stress or exertion. However, our findings should be also interpreted carefully since they have been obtained in specific experimental conditions and their generalization could be highly speculative. Furthermore, researchers interested in using UA measurements in saliva in other exercise protocols or clinical situations may also be well advised to reassess these comparisons as a pilot study in the laboratory using their own assay conditions and experimental procedures.

5. Conclusions

Overall, this report highlights the importance of an adequate sampling method selection as well as the expression of results when analytes are measured in saliva, and also stresses the need to follow standardized sampling procedures to give high-quality analytical results in these situations. It is important to point out that the use of saliva for UA measurements can have important practical applications. By monitoring the UA in saliva, situations in which there is an increase in oxidative stress can be detected and identified and appropriate measures could be taken in order to reduce or compensate the oxidative stress status. Overall, saliva can be easily used for routine evaluation of the UA level if the sample is properly collected and result adequately expressed.

Author Contributions: Conceptualization, J.M.G.-H., P.J.-R., R.C., J.J.C. and A.T.; methodology, J.M.G.-H., L.F., D.C.-P., G.M., L.M.M.-A., S.M.-S., P.J.-R.; formal analysis, J.M.G.-H., L.F., A.T.; resources, R.C., J.J.C., P.J.-R.; data curation, J.M.G.-H., L.F., J.J.C., P.J.-R., A.T.; writing—original draft preparation, J.M.G.-H., J.J.C., A.T.; writing—review and editing, L.F., D.C.-P., S.M.-S., R.C., G.M., L.M.M.-A., P.J.-R.

Funding: This research was funded by the Seneca Foundation of Murcia Region, grant number 19894/GERM/15.

Acknowledgments: The authors thank all subjects who participated in this study.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Wong, D.T. Salivary diagnostics powered by nanotechnologies, proteomics and genomics. *J. Am. Dent. Assoc.* **2006**, *137*, 313–321. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. González, D.; Marquina, R.; Rondón, N.; Rodríguez-Malaver, A.J.; Reyes, R. Effects of aerobic exercise on uric acid, total antioxidant activity, oxidative stress, and nitric oxide in human saliva. *Res. Sports Med.* **2008**, *16*, 128–137. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Bahar, G.; Feinmesser, R.; Shpitzer, T.; Popovtzer, A.; Nagler, R.M. Salivary analysis in oral cancer patients. *Cancer* **2007**, *109*, 54–59. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Guentsch, A.; Preshaw, P.M.; Bremer-Streck, S.; Klinger, G.; Glockmann, E.; Sigusch, B.W. Lipid peroxidation and antioxidant activity in saliva of periodontitis patients: Effect of smoking and periodontal treatment. *Clin. Oral Investig.* **2008**, *12*, 345–352. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Arana, C.; Cutando, A.; Ferrera, M.; Gómez-Moreno, G.; Worf, C.; Bolaños, M.; Escames, G.; Acuña-Castroviejo, D. Parameters of oxidative stress in saliva from diabetic and parenteral drug addict patients. *J. Oral Pathol. Med.* **2006**, *35*, 554–559. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

6. Bibi, G.; Green, Y.; Nagler, R.M. Compositional and oxidative analysis in the saliva and serum of predialysis chronic kidney disease patients and end-stage renal failure patients on peritoneal dialysis. *Ther. Apher. Dial.* **2008**, *12*, 164–170. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Deminice, R.; Sicchieri, T.; Payao, P.O.; Jordao, A.A. Blood and Salivary Oxidative Stress Biomarkers Following an Acute Session of Resistance Exercise in Humans. *Int. J. Sports Med.* **2010**, *31*, 599–603. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Battino, M.; Ferreiro, M.S.; Gallardo, I.; Newman, H.N.; Bullon, P. The antioxidant capacity of saliva. *J. Clin. Periodontol.* **2002**, *29*, 189–194. [[CrossRef](#)]
9. Kuzkaya, N.; Weissmann, N.; Harrison, D.G.; Dikalov, S. Interactions of peroxynitrite with uric acid in the presence of ascorbate and thiols: Implications for uncoupling endothelial nitric oxide synthase. *Biochem. Pharmacol.* **2005**, *70*, 343–354. [[CrossRef](#)]
10. Drinkwater, E.J.; Lawton, T.W.; Lindsell, R.P.; Pyne, D.B.; Hunt, P.H.; McKenna, M.J. Training leading to repetition failure enhances bench press strength gains in elite junior athletes. *J. Strength Cond. Res.* **2005**, *19*, 382–388.
11. Schoenfeld, B.J.; Ogborn, D.; Vigotsky, D.; Franchi, M.V.; Krieger, J.W. Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Strength Cond. Res.* **2017**, *31*, 2599–2608. [[CrossRef](#)]
12. Folland, J.P.; Irish, C.S.; Roberts, J.C.; Tarr, J.E.; Jones, D.A. Fatigue is not a necessary stimulus for strength gains during resistance training. *Br. J. Sports Med.* **2002**, *36*, 370–373. [[CrossRef](#)]
13. Celec, P.; Ostatníková, D. Saliva collection devices affect sex steroid concentrations. *Clin. Chim. Acta* **2012**, *413*, 1625–1628. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Shirtcliff, E.A.; Granger, D.A.; Schwartz, E.; Curran, M.J. Use of salivary biomarkers in biobehavioral research: Cotton-based sample collection methods can interfere with salivary immunoassay results. *Psychoneuroendocrinology* **2001**, *26*, 165–173. [[CrossRef](#)]
15. Contreras-Aguilar, M.D.; Escribano, D.; Martínez-Subiela, S.; Martínez-Miró, S.; Rubio, M.; Tvarijonavičute, A.; Tecles, F.; Cerón, J.J. Influence of the way of reporting alpha-Amylase values in saliva in different naturalistic situations: A pilot study. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0180100. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Chielle, E.O.; Casarin, J.N. Evaluation of salivary oxidative parameters in overweight and obese young adults. *Arch. Endocrinol. Metab.* **2017**, *61*, 152–159. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Kondakova, I.; Lissi, E.A.; Pizarro, M. Total reactive antioxidant potential in human saliva of smokers and non-smokers. *IUBMB Life* **1999**, *47*, 911–920. [[CrossRef](#)]
18. Sánchez-Medina, L.; González-Badillo, J.J. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during Resistance Training. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2011**, *43*, 1725–1734. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Rohleder, N.; Nater, U.M. Determinants of salivary alpha-amylase in humans and methodological considerations. *Psychoneuroendocrinology* **2009**, *34*, 469–485. [[CrossRef](#)]
20. Riis, J.; Bryce, C.; Hand, T.; Bayer, J.; Matin, M.; Stebbins, J.; Kornienko, O.; Segal, S.; van Huisstede, L.; Granger, D. The validity, stability, and utility of measuring uric acid in saliva: A salivary bioscience-biobehavioral research interface. *Biomark. Med.* **2018**, *12*, 583–596. [[CrossRef](#)]
21. Lamey, P.; Nolan, A. The recovery of human saliva using the Salivette system. *Eur. J. Clin. Chem. Clin. Biochem.* **1994**, *32*, 727. [[PubMed](#)]
22. Kruger, C.; Breunig, C.; Biskupek-Sigwart, J.; Dorr, H. Problems with salivary 17-hydroxyprogesterone determinations using the Salivette(R) device. *Eur. J. Clin. Chem. Clin. Biochem.* **1996**, *34*, 927–929.



Estudio III

SPORTS BIOMECHANICS
<https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1766102>



Check for updates

Effect of different interset rest intervals on mean velocity during the squat and bench press exercises

Jorge M. González-Hernández^{a,b}, Pedro Jimenez-Reyes^c, Danica Janicijevic^d, James J. Tufano^e, Gonzalo Marquez^{f,g} and Amador Garcia-Ramos^{f,g}

Q1^aNeuromove Research Group, Faculty of Sport, Catholic University of San Antonio (UCAM), Murcia, Spain; 5
 Q2^bFaculty of Health Science, European University of Canarias, La Orotava, Spain; ^cCentre for Sports Studies, Rey Juan Carlos University, Alcorcón, Spain; ^dThe Research Centre, Faculty of Sport and Physical Education, University of Belgrade, Belgrade, Serbia; ^eFaculty of Physical Education and Sport, Charles University, Prague, Czech Republic; ^fDepartment of Physical Education and Sport, Faculty of Sport Sciences, University of Granada, Granada, Spain; ^gDepartment of Sports Sciences and Physical Conditioning, Faculty of Education, Catholic University of the Most Holy Concepción, Concepción, Chile 10

ABSTRACT

This study aimed to compare the effect of three interset rest intervals (1, 3, and 5 minutes) on (I) mean velocity during a resistance training session conducted in a Smith machine with the squat and bench press exercises, and (II) the pre- and post-exercise force-velocity relationship. Fifteen male university students completed three sessions (i.e., Rest 1', Rest 3', and Rest 5') consisting of three sets of five repetitions against the 10RM load during the squat and bench press exercises. The force-velocity relationship (maximal values of force [F_0], velocity [v_0], and power [P_{max}]) was evaluated at the beginning and at the end of each session with the counter-movement jump and bench press throw exercises. During training, mean velocity was slower in sets 2 and 3 of the Rest 1' protocol compared to Rest 3' and Rest 5', but no significant differences were present between Rest 3' and Rest 5'. After training, there was a significant decrease in F_0 ($p = 0.017$) and P_{max} ($p = 0.010$), but not in v_0 ($p = 0.259$). These results support the Rest 3' as the most time-efficient protocol, among those analysed, for the maintenance of high mean velocities during training sessions not leading to failure. 15

ARTICLE HISTORY

Received 3 January 2020
 Accepted 3 May 2020 20

KEYWORDS

Force-velocity relationship;
 linear position transducer;
 strength training;
 velocity-based training 25

Introduction

Resistance training (RT) is commonly used to improve strength, power, hypertrophy, and athletic performance (American College of Sports Medicine, 2009; Tan, 1999). The manipulation of RT variables (e.g., type of exercise, load, number of sets and repetitions, movement velocity, interset rest periods, etc.) underpins the acute training stimulus and, consequently, the physiological adaptations to training (Spiering et al., 2008). When designing RT programs, these variables should not be considered in isolation because the training stimulus depends on their combined effect (Coffey & Hawley, 2007). For example, velocity output is affected by the load magnitude (slower velocities at greater 35 40

CONTACT Jorge M. González-Hernández jorgemiguel.gonzalez@universidadeuropea.es

© 2020 Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group

2  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.

loads) and the number of repetitions performed (slower velocities during the last repetitions of a training set) (García-Ramos et al., 2018; Morán-Navarro et al., 2019). However, a question that remains to be addressed is the influence of the interset rest intervals on mean velocity. This is an important question because maintaining fast velocities during RT has been associated with larger improvements in sport actions such as sprinting and jumping (González-Badillo et al., 2014; Pareja-Blanco et al., 2016). 45

Previous studies have shown that the acute and chronic effects of RT are influenced by the interset rest intervals (Ahtiainen et al., 2005; Kraemer et al., 1987; Senna et al., 2009). The American College of Sports Medicine recommend short interset rest intervals (e.g., 30–90 seconds) during hypertrophy-oriented RT sessions, whereas longer interset rest intervals (e.g., 3–5 minutes) are recommended during strength-oriented and power-oriented RT sessions (Ratamess et al., 2009). However, recent evidence suggests that longer rest periods could also be recommended during hypertrophy based training because the ability to lift heavy loads could be reduced when short rest intervals are implemented resulting in a reduced hypertrophic stimulus (Schoenfeld et al., 2016). The maximum number of repetitions that can be completed is one of the variables most used to quantify the effect of interset rest intervals on mechanical performance (Rahimi, 2005; Senna et al., 2009). Rahimi (2005) showed that 5 minutes of interset rest allowed a higher volume than interset rest intervals of 1 and 2 minutes during a RT session consisting of 4 sets at the 85% of the one-repetition maximum (1RM) with the squat (SQ) exercise. Senna et al. (2009) also found that the number of repetitions completed during a RT session with the leg press, leg extension, leg curl, bench press (BP), pec-deck and triceps pulley exercises was higher using 5 minutes compared to 2 minutes of interset rest. These results could be expected because it is known that longer rest intervals increase the recovery of bioenergetic factors such as adenosine triphosphate (ATP) and phosphocreatine (PCr) (Wells et al., 2009). However, the effect of interset rest intervals on mechanical variables when RT sets are not performed to muscular failure has received less scientific attention. This issue is worth investigating since previous studies have revealed greater increments in athletic performance when RT sets are not performed to failure (Davies et al., 2015; Folland et al., 2002; Nóbrega & Libardi, 2016; Pareja-Blanco et al., 2016). 70

Another important factor that should be considered is the residual fatigue induced by RT sessions. The mechanical fatigue induced by RT has been frequently assessed as the decrement in performance (e.g., jump height, movement velocity, or isometric force) against a single loading condition (Dos'Santos et al., 2017; Pérez-Castilla, García-Ramos, et al., 2018). However, a drawback of this procedure is that it does not allow to discern if a deterioration in performance is caused by a decrease in the maximal capacities of the muscles to produce force, velocity, or both (García-Ramos et al., 2018; Jaric, 2016). The force-velocity (F-v) relationship should be determined to selectively assess the changes in the maximal capacities of the muscles to produce force (F_0), velocity (v_0), and power (P_{max}) (García-Ramos & Jaric, 2019). It has been recently shown that the F-v relationship is a valid approach to assess the changes in F_0 , v_0 and P_{max} capacities after RT sets conducted with the BP exercise against different loads (60%1RM and 80%1RM) and using different training strategies (e.g., leading or not to muscular failure) (García-Ramos et al., 2018). It is noteworthy that, due to the high linearity of the F-v relationship, the testing procedure of the F-v relationship can be simplified performing trials against only two different loads (i.e., two-point method) (García-Ramos & Jaric, 2018). Therefore, an 85

important issue to explore through the F-v relationship modelling could be the effect of RT sessions differing in the interset rest interval on the magnitude of F_0 , v_0 and P_{max} .

The aims of the present study were (I) to compare the effect of three different interset rest intervals (1, 3, and 5 minutes) on mean velocity during a RT session conducted with the SQ and BP exercises performed in a Smith Machine, and (II) to explore the fatigue induced by RT sessions differing only in the interset rest duration on the F-v relationship of lower- and upper-body muscles. We hypothesised that (I) the slowest and the fastest mean velocities would be observed for the interset rest intervals of 1 and 5 minutes, respectively, and (II) all RT sessions, regardless of the interset rest interval, would have a negative impact on the F-v relationship of lower- and upper-body muscles (i.e., lower values of F_0 , v_0 , and P_{max}), but the largest negative effects would occur as a result of shorter interset rest intervals.

Methods

Participants

Fifteen male sport science students (mean \pm standard deviation [SD]; age = 20.3 ± 3.3 years, body mass = 72.1 ± 8.3 kg, height = 1.73 ± 0.04 m, SQ 10RM = 63.2 ± 11.7 kg, and BP 10RM = 47.3 ± 16.5 kg) participated in this study. Participants reported to be enrolled in RT programs that included the SQ and BP exercises for a minimum of 1 year and all them demonstrated a proper execution technique during both exercises. All participants were informed about the study procedures and signed a written informed consent before the initiation of the study. The study protocol adhered to the tenets of the Declaration of Helsinki and was approved by the Institutional Review Board of the University of Granada (935/CEIH/2019).

Experimental design

A randomised crossover design was used to explore the effect of different interset rest intervals during a RT session on barbell velocity and the F-v relationship (Figure 1). Participants came to the laboratory on six occasions, twice a week, separated by at least 48 hours, over three consecutive weeks. Sessions 1–2 were used to ensure that all the participants could perform the SQ, countermovement jump (CMJ), BP and BP throw (BPT) exercises with proper technique against a variety of external loads. Session 3 was used to determine the 10RM load during the SQ and BP exercises, as well as the external

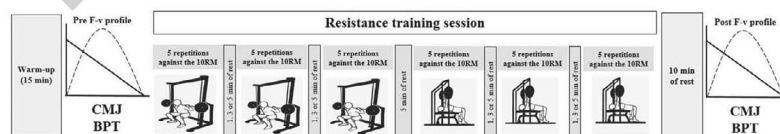


Figure 1. Overview of the experimental sessions. The order of the squat and bench press exercises performed during training and the interset rest protocols (1, 3 or 5 minutes) was counterbalanced between participants. CMJ, countermovement jump; BPT, bench press throw; RM, repetition maximum; F-v, force-velocity.

4  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.

load associated with a jump height of 12 cm during the CMJ exercise. The 10RM load determined in session 3 was applied during the remaining experimental sessions (details of the main experimental sessions are presented below). Following previous studies, the external load associated with a jump height of 12 cm was used to determine the F-v relationship during the CMJ exercise in the three main experimental sessions (García-Ramos et al., 2018). 120

The three main experimental sessions (sessions 4–6) consisted of three sets of five repetitions against the 10RM load during the SQ and BP exercises. The only difference between the three experimental sessions was the interset rest duration (1 minute [Rest 1'], 3 minutes [Rest 3'] and 5 minutes [Rest 5']). The order of the SQ and BP exercises was counterbalanced between participants, but the same order was followed for individual participants in the three experimental sessions. The order of the interset rest protocols was randomised. The F-v relationship during the CMJ and BPT exercises was determined on two occasions during each session: 5 min after the warm-up (Pre) and 10 min after the last set of the training session (Post). All sessions were performed at the same time of the day for each participant. 130

Experimental sessions (sessions 4-6)

1. *Warm-up.* At the beginning of each RT session participants performed 5 minutes of jogging, dynamic stretching, 10 unloaded SQ, 5 SQ loaded by 50% of the 10RM load, 2 SQ against the 10RM load, 10 push-ups, 5 BP loaded by 50% of the 10RM load, and 2 BP against the 10RM load. 135

2. *Force-velocity relationship modelling.* Following the warm-up procedure, the F-v relationship was determined during the CMJ and BPT exercises through the two-point method (García-Ramos & Jaric, 2018). Two unloaded CMJs (light load) and two CMJs with the external load associated with a jump height of ≈ 12 cm (heavy load: 51.8 ± 13.6 kg) were performed separated by 1 minute. Thereafter, two trials of the BPT against the unloaded Smith machine barbell (light load: 20 kg for all participants) and two trials against the 10RM load (heavy load: 47.3 ± 16.5 kg) were performed separated by 1 minute. The trial with the highest jump height (CMJ) and fastest mean propulsive velocity (BPT) of each load was used for modelling the F-v relationship. It should be noted that the F-v relationship was also determined 10 minutes after completing the RT session in order to assess the residual fatigue of the RT sessions on F_0 , v_0 , and P_{max} . 140

The mean propulsive values of force and velocity were used to determine the F-v relationship during the CMJ exercise through the simple method proposed by Samozino and colleagues (Jiménez-Reyes et al., 2017; Samozino et al., 2008). Jump height was estimated from flight time using a validated mobile application (MyJump2) that recorded the video-image at 240 fps through an iPhone 8 plus (Balsalobre-Fernandez et al., 2015). The mean propulsive values of force and velocity used to determine the F-v relationship during the BPT exercise were collected with a linear velocity transducer (T-Force System; Ergotech, Murcia, Spain) (Courel-Ibáñez et al., 2019; García-Ramos et al., 2018). The loaded CMJ and BPT were performed in a Smith machine (Multipower FF683; Ffittech, Santo Estevao, Portugal). The mean propulsive values of force and velocity obtained under two loading conditions were used for the assessment of the F-v relationship through a linear model: $F(V) = F_0 - aV$, in which F_0 represents the force 145 150 155 160

intercept and a is the slope of the F-v relationship. The maximum velocity ($v_0 = F_0/a$) and maximum power ($P_{\max} = F_0 \cdot v_0/4$) were also calculated. An acceptable reliability of the two-point method for determining the F-v relationship during the CMJ and BPT exercises has been reported elsewhere (Garcia-Ramos et al., 2018; Pérez-Castilla, Jaric, et al., 2018). 165

3. *Resistance training session.* Each RT session consisted of three sets of five repetitions with the 10RM load during the full SQ and touch-and-go BP exercises. The only difference between the three experimental sessions was the duration of the interset rest interval: 1 minute (Rest 1' protocol), 3 minutes (Rest 3' protocol) and 5 minutes (Rest 5' protocol). The order of the exercises (SQ and BPT) and rest protocols (Rest 1', Rest 3' and Rest 5') was randomised. Regardless of the rest protocol, 5 minutes of rest were implemented between the SQ and BP exercises. Participants were encouraged to perform the concentric phase of all repetitions as fast as possible and the mean velocity was collected with a linear velocity transducer. 170 175

Statistical analysis

Descriptive data are presented as means and SD. The normal distribution of the data (Shapiro-Wilk test) and the homogeneity of variances (Levene's test) were confirmed ($p > 0.05$). A three-way repeated measures ANOVA (exercise [SQ and BP], set [1, 2 and 3], and rest protocol [Rest 1', Rest 3' and Rest 5']) with Bonferroni post hoc corrections was conducted on the mean velocity of each set. A one-way ANOVA with Bonferroni post hoc corrections were also used to compare the mean velocity of each individual repetition between the rest protocols separately for the SQ and BP exercises. Finally, a three-way repeated measures ANOVA (exercise [SQ and BP], time [Pre and Post], and rest protocol [Rest 1', Rest 3' and Rest 5']) with Bonferroni post hoc corrections was applied on each F-v relationship parameter (F_0 , v_0 , and P_{\max}). The intraclass correlation coefficient (ICC, model 3.1) calculated from the three Pre-session values revealed a high reliability for F_0 (ICC = 0.91 for CMJ and 0.98 for BPT) v_0 (ICC = 0.80 for CMJ and 0.81 for BPT) and P_{\max} (ICC = 0.80 for CMJ and 0.96 for BPT). All statistical analyses were performed using SPSS software version 22.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) and statistical significance was set at an alpha level of 0.05. 180 185 190

Results

The main effects of exercise, number of sets (set 1 > set 3 [5.7% higher velocity]; set 2 > set 3 [3.2% higher velocity]), and rest protocol (Rest 3' > Rest 1' [11.7% higher velocity]; Rest 5' > Rest 1' [7.4% higher velocity] reached statistical significance (Table 1, Figure 2). No significant differences in mean velocity were observed between the sets 1 and 2 ($p = 0.052$, 2.4% higher velocity) nor between the Rest 3' and Rest 5' protocols ($p = 0.088$, 3.9% higher velocity). The exercise \times set interaction ($p = 0.012$) was caused by the higher velocity loss observed in the BP compared to the SQ (set 3 vs. set 1: 11.8% and 1.6% of velocity loss, respectively). The set \times rest protocol interaction ($p < 0.001$) was caused by the lower velocities at sets 2 and 3 for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols. The velocity achieved against individual repetitions was lower for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' (4 repetitions 195 200

6  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.**Table 1.** Three-way repeated measures ANOVA used to compare movement velocity between the exercises, sets, and rest protocols.

Exercise	Set	Rest 1' (m/s)	Rest 3' (m/s)	Rest 5' (m/s)	Main effects	Interactions
Squat	1	0.65 ± 0.07	0.66 ± 0.07	0.64 ± 0.06	E: $F = 50.2, p < 0.001$ S: $F = 12.3, p < 0.001$ R: $F = 19.9, p < 0.001$	E × S: $F = 5.3, p = 0.012$ E × R: $F = 2.4, p = 0.110$ S × R: $F = 9.5, p < 0.001$
	2	0.62 ± 0.07	0.67 ± 0.08	0.64 ± 0.09		
	3	0.61 ± 0.09	0.66 ± 0.08	0.64 ± 0.09		
Bench press	1	0.45 ± 0.08	0.48 ± 0.06	0.46 ± 0.06		E × S × R: $F = 3.9, p = 0.008$
	2	0.40 ± 0.10	0.48 ± 0.07	0.46 ± 0.06		
	3	0.34 ± 0.12	0.47 ± 0.06	0.45 ± 0.07		

Rest 1', 1 minute of interset rest; Rest 3', 3 minutes of interset rest; Rest 5', 5 minutes of interset rest. E, exercise; S, set; R, interset rest.

in the SQ and 9 repetitions in the BP) and Rest 5' protocols (7 repetitions in the BP), while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5' protocols (Figure 3).

The results of three-way ANOVA conducted on each F-v relationship parameter are depicted in Table 2. A significant main effect of time was observed for F_0 and P_{\max} due to lower values at Post (−2.5% and −5.4%, respectively). The main effect of the rest protocol was significant for v_0 and P_{\max} due to higher values for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' (5.1%) and Rest 5' protocols (6.7%). The exercise × time interaction was only significant for P_{\max} due to a higher impairment at Post in the CMJ compared to the BPT. The exercise × rest protocol interaction was significant for v_0 and P_{\max} due to higher values for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols during the CMJ, while no significant differences were observed during the BPT. The time × rest protocol interaction was significant for all parameters (F_0 : higher decrement for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols; v_0 : higher decrement for the Rest 5' protocol compared to the Rest 1' and Rest 3' protocols; P_{\max} : lower decrement for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols). Pairwise comparisons between the time points and rest protocols are presented in Figure 4.

Discussion and implications

This study was designed to compare mean velocity and the changes in the F-v relationship parameters between RT sessions differing only in the duration of the interset rest intervals. The RT session comprised three sets of a lower-body (SQ) and three sets of an upper-body (BP) exercise. The main findings of this study revealed lower velocities for the Rest 1' protocol compared to the Rest 3' and Rest 5' protocols, while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5' protocols. However, the decrement in P_{\max} was higher for the Rest 3' and Rest 5' protocols compared to the Rest 1' protocol. Therefore, although the Rest 1' protocol does compromise the maintenance of high mean velocities during the successive sets of a RT session, the residual fatigue induced by the RT session (assessed by the decrement in the magnitude of the F-v relationship parameters) does not seem to be increased when short interset rest intervals are used.

The adaptation of the neuromuscular system to RT is mediated by the stimuli received (Coffey & Hawley, 2007; Pareja-Blanco et al., 2016). Lifting at maximal velocity is effective to develop muscular power and the rate of force development (RFD), whereas intentionally lifting at slow velocities could be effective to induce hypertrophy adaptations

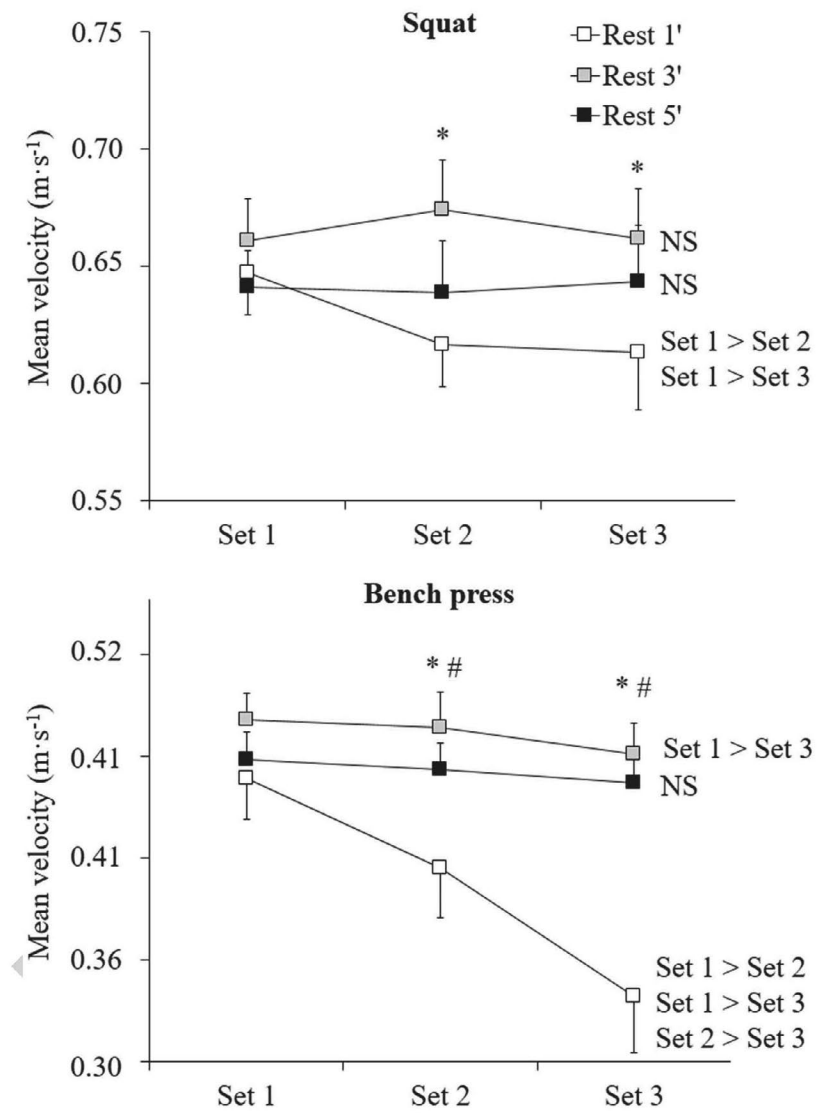


Figure 2. Comparison of mean velocity between the different intersets rest protocols and number of sets for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'. NS, no significant differences between sets.

8 J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.

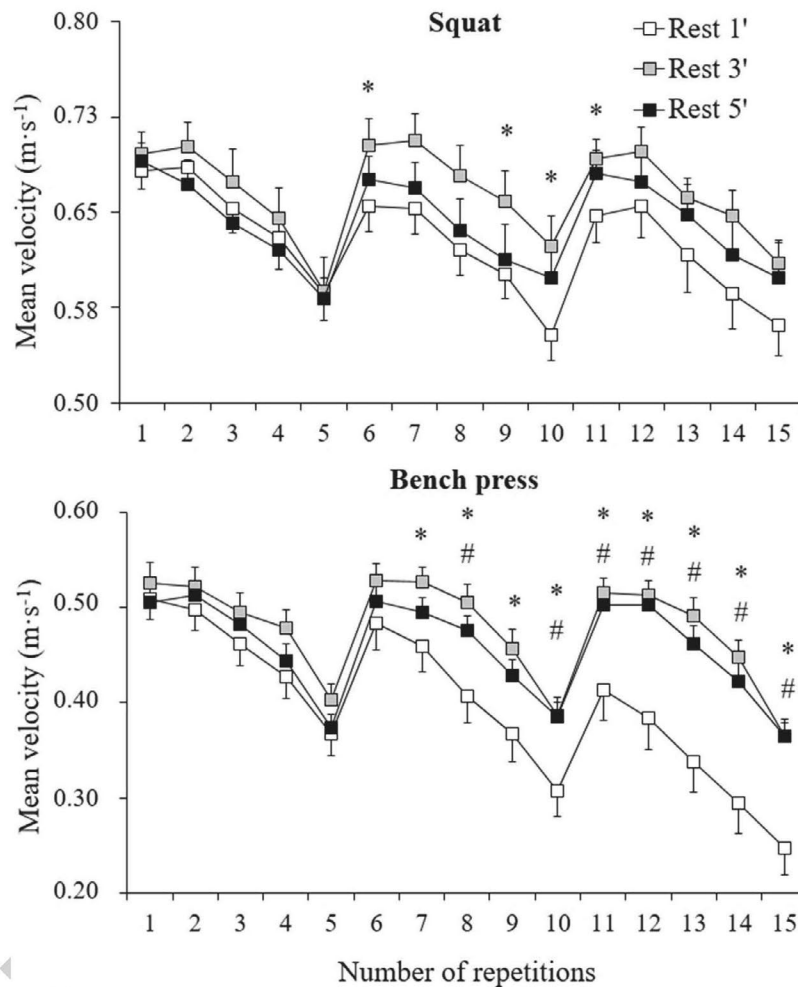


Figure 3. Comparison of mean velocity at each repetition between the intersets rest protocols of 1 minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 minutes (Rest 5'; grey squares) for the squat (upper panel) and bench press (lower panel) exercises. Error bars depict the standard error. *, Rest 3' significantly faster than Rest 1'; #, Rest 5' significantly faster than Rest 1'.

(Izquierdo et al., 2006; Pareja-Blanco et al., 2016), although Schoenfeld et al. (2016) has shown that high velocities can also induce hypertrophy gains. Therefore, since maximal power and RFD are of paramount importance for the performance of many sport-specific tasks (e.g., jumping, sprinting, change of direction, throwing, etc.) (Pareja-Blanco et al., 2014; González-Badillo et al., 2014), athletes are frequently encouraged to maximise 240

Table 2. Three-way repeated measures ANOVA used to compare the force-velocity relationship parameters between the exercises, point of measure, and rest protocols.

Parameter	Exercise	Time	Rest 1'	Rest 3'	Rest 5'	Main effects	Interactions	
F_0 (N)	CMJ	Pre	2155 ± 373	2188 ± 405	2148 ± 396	E: $F = 535.1$, $p < 0.001$	E × T: $F = 1.6$, $p = 0.233$ E × R: $F = 2.3$, $p = 0.118$ T × R: $F = 6.5$, $p = 0.005$ E × T × R: $F = 4.8$, $p = 0.017$	
		Post	2017 ± 293	2187 ± 359	2127 ± 333			
	BPT	Pre	716 ± 141	732 ± 144	722 ± 147			T: $F = 7.3$, $p = 0.017$
		Post	695 ± 149	700 ± 147	713 ± 131			R: $F = 3.3$, $p = 0.051$
v_0 (m/s)	CMJ	Pre	3.46 ± 0.93	3.42 ± 0.85	3.35 ± 0.61	E: $F = 18.4$, $p = 0.001$	E × T: $F = 2.8$, $p = 0.117$ E × R: $F = 5.2$, $p = 0.012$ T × R: $F = 5.7$, $p = 0.008$ E × T × R: $F = 4.1$, $p = 0.026$	
		Post	3.61 ± 0.77	3.01 ± 0.37	3.05 ± 0.49			
	BPT	Pre	2.52 ± 0.32	2.51 ± 0.34	2.51 ± 0.31			T: $F = 1.4$, $p = 0.259$
		Post	2.53 ± 0.30	2.60 ± 0.27	2.46 ± 0.34			R: $F = 4.7$, $p = 0.018$
P_{max} (W)	CMJ	Pre	1805 ± 303	1816 ± 306	1759 ± 246	E: $F = 548.3$, $p < 0.001$	E × T: $F = 7.4$, $p = 0.016$ E × R: $F = 6.0$, $p = 0.007$ T × R: $F = 3.4$, $p = 0.048$ E × T × R: $F = 3.8$, $p = 0.035$	
		Post	1805 ± 353	1627 ± 227	1609 ± 263			
	BPT	Pre	455 ± 120	461 ± 117	452 ± 103			T: $F = 8.8$, $p = 0.010$
		Post	442 ± 117	457 ± 114	443 ± 115			R: $F = 4.7$, $p = 0.018$

F_0 , maximal force; v_0 , maximal velocity; P_{max} , maximal power; Rest 1', 1 minute of interset rest; Rest 3', 3 minutes of interset rest; Rest 5', 5 minutes of interset rest. E, exercise; T, Time; R, interset rest.

velocity performance during RT (Weakley et al., 2018). Despite the proven benefits of training at high velocities, little research has been conducted to examine the effect of manipulating different RT variables on the capacity to develop high velocities during RT. To our knowledge, this is the first study that has examined the effect of different interset rest intervals (1, 3 and 5 minutes) on the capacity to maintain high velocities during RT. 245

Our first hypothesis was only partially supported. As hypothesised, the Rest 1' protocol provided slower velocities during the sets 2 and 3 in comparison to the Rest 3' and Rest 5' protocols for both the SQ and BP exercises. However, although we also hypothesised faster velocities for the Rest 5' protocol compared to the Rest 3' protocol, no significant differences in mean velocity were observed between these protocols. The lower velocity performance for the Rest 1' protocol was expected because longer rest intervals increase the recovery of ATP and PCr, while it could be speculated that the levels of ATP and PCr could be recovered after 3 minutes specially when the training sets are not performed to failure (Wells et al., 2009). Therefore, although the Rest 3' and Rest 5' protocols allowed a comparable velocity performance, the Rest 3' protocol presents the main advantage of the RT session being shorter. Similar results were obtained by Abdessemed et al. (1999) who reported higher blood lactate concentration and lower power production during a RT session that comprised 10 sets of 6 repetitions of the BP at 70%1RM using interset rest intervals of 1 minute compared to interset rest intervals of 3 and 5 minutes. The load magnitude ($\approx 75\%1RM$) and the training strategy (i.e., sets not performed to muscular failure) could have influenced these results, being plausible that the use of heavier loads or leaving less repetitions in reserve (i.e., approaching to muscular failure) would require longer interset rest for maintaining velocity performance during RT sessions. However, based on the results discussed above, it seems that 3 minutes of interset rest is optimal for the maintenance of high velocities during RT sessions conducted with the SQ and BP exercises against moderate loads ($\approx 75\%1RM$ or 10RM) when approximately half of the maximum number of repetitions per set are performed. 260 265

To our knowledge, this has also been the first study that has used the F-v relationship modelling to quantify the fatigue induced by RT sessions on F_0 , v_0 , and P_{max} . We hypothesised

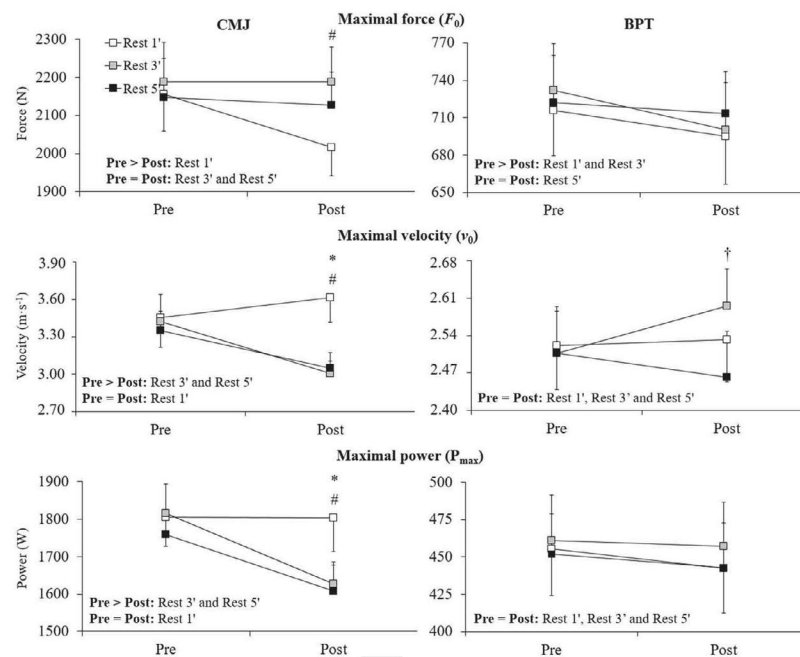
10  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.

Figure 4. Comparison of the maximal capacities of the muscles to produce force (upper-panel), velocity (middle panel) and power (lower panel) before (Pre) and after (Post) the training session for the inter-set rest protocols of 1 minute (Rest 1'; white squares), 3 minutes (Rest 3'; black squares) and 5 minutes (Rest 5'; grey squares) during the countermovement jump (CMJ; left panels) and bench press throw (BPT; right panels) exercises. Error bars depict the standard error. *, significant differences between Rest 1' and Rest 3'; #, significant differences between Rest 1' and Rest 5'; †, significant differences between Rest 3' and Rest 5'.

that a significant decrement in F_0 , v_0 , and P_{max} would be observed after all RT sessions, being 270
the decrement accentuated using shorter inter-set rest intervals. This hypothesis was only
partially confirmed since after the RT sessions a significant decrease was observed for F_0 and
 P_{max} , but not in v_0 . However, the lack of significant change for v_0 is in line with the study of
García-Ramos et al. (2018) who reported a significant decrement in F_0 but not in v_0 after RT
sets not performed to failure during the BP exercise. Therefore, reducing the level of effort by 275
performing approximately half of the maximum number of repetitions per sets seems an
appropriate strategy to preserve v_0 capacity. Although the decrement in mean velocity during
training was higher for the Rest 1' protocol, the magnitude of the deterioration of the
F-v relationship parameters after training did not differ between the different inter-set rest
protocols. The lack of differences in the residual fatigue induced by the RT sessions could be 280
explained because after 10 minutes of rest the recovery of bioenergetic factors such as ATP and
PCr should be similar for the three inter-set rest protocols (Wells et al., 2009; Willardson &
Burkett, 2005).

One limitation of the study is that only mechanical variables were collected. Therefore, the response of other variables that are known to influence the acute training stimulus and the subsequent neuromuscular and physiological adaptations (e.g., metabolic biomarkers [e.g., lactate], muscle damage markers [e.g., creatine kinase] or hormones [e.g., testosterone and cortisol]) remain unexplored. Future studies should also explore the effect of intersets rest duration on mechanical performance using other exercises (e.g., leg press or pull-ups), loads (e.g., 20RM and 5RM), training strategies (i.e., proximity to failure), and participant populations (e.g., women or highly trained athletes). For example, although the Rest 3' protocol provided satisfactory results in the present study, it is plausible that longer intersets rest periods are needed to maintain mechanical performance when lifting heavier loads or when the sets are finished closer to failure. Finally, it is important to note that only 3 sets were performed for each exercise and, therefore, it remains to be elucidated whether the Rest 5' protocol could provide better results than the Rest 3' protocol with increasing number of sets. However, the results of the present study provide valuable practical information because it is frequent to prescribe 3 sets per exercise during RT programs.

Conclusion

Finally, we can conclude that mean velocity during training was significantly lower for Rest 1' compared to Rest 3' and Rest 5', while no significant differences were observed between the Rest 3' and Rest 5'. The residual fatigue of the RT sessions on the magnitude of the F-V relationship parameters was not meaningfully affected by the intersets rest intervals. Therefore, Rest 3' and Rest 5' could be recommended over Rest 1' for the maintenance of acute mean velocities during training, with Rest 3' possibly desirable over Rest 5' because it shortens the RT session. The Rest 3' protocol should be recommended for the maintenance of high velocities during RT sessions conducted with the SQ and BP exercises performed against the 10RM load when only half of the maximum number of repetitions per set are performed. However, the level of fatigue induced by the RT session does not seem to be affected by the intersets rest interval.

Acknowledgments


We are grateful to all the participants who took part in this investigation.

Disclosure statement


No financial interest or benefit has arisen from the direct applications of our research.


ORCID

Jorge M. González-Hernández  <http://orcid.org/0000-0003-3835-7104>

Pedro Jimenez-Reyes  <http://orcid.org/0000-0002-8156-243X>

James J. Tufano  <http://orcid.org/0000-0001-8325-0344>

Gonzalo Marquez  <http://orcid.org/0000-0002-2305-5229>

Amador Garcia-Ramos  <http://orcid.org/0000-0003-0608-8755>

12  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.**Q13** **References**

- Abdessemed, D., Duché, P., Hautier, C., Poumarat, G., & Bedu, M. (1999). Effect of recovery duration on muscular power and blood lactate during the bench press exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 20(6), 368–373. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971146> 325
- Ahtiainen, J., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W., & Häkkinen, K. (2005). Short vs. long rest period between the sets in hypertrophic resistance training: Influence on muscle strength, size, and hormonal adaptations in trained men. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(3), 572–582. <https://doi.org/10.1519/15604.1> 330
- American College of Sports Medicine. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(3), 687–708. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181915670> 335
- Balsalobre-Fernandez, C., Glaister, M., & Lockey, R. A. (2015). The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 33(15), 1574–1579. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184> 335
- Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The molecular bases of training adaptation. *Sport Medicine*, 37(9), 737–763. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737090-00001> 340
- Courel-Ibáñez, J., Martínez-Cava, A., Morán-Navarro, R., Escribano-Peñas, P., Chavarren-Cabrero, J., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Reproducibility and repeatability of five different technologies for bar velocity measurement in resistance training. *Biomedical Engineering*, 47(7), 1523–1538. <https://doi.org/10.1007/s10439-019-02265-6> 340
- Davies, T., Orr, R., Halaki, M., & Hackett, D. (2015). Effect of training leading to repetition failure on muscular strength: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 46(4), 487–502. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0451-3> 345
- Dos Santos, T., Thomas, C., Comfort, P., McMahon, J. J., Jones, P. A., Oakley, N. P., & Young, A. L. (2017). Between-session reliability of isometric mid-thigh pull kinetics and maximal power clean performance in male youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(12), 3364–3372. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001830> 350
- 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. <https://doi.org/10.1136/bjism.36.5.370> 350
- García-Ramos, A., & Jaric, S. (2018). Two-point method: A quick and fatigue-free procedure for assesment of muscle mechanical capacities and the 1 repetition maximum. *Strength and Conditioning Journal*, 40(2), 54–66. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000359> 355
- García-Ramos, A., & Jaric, S. (2019). Optimization of the force-velocity relationship obtained from the bench press throw exercise: An a-posteriori multicentre reliability study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(3), 317–322. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2018-0457> 360
- García-Ramos, A., Pérez-Castilla, A., & Jaric, S. (2018). Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps. *Sports Biomechanics*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1545044> 360
- García-Ramos, A., Torrejón, A., Feriche, B., Morales-Artacho, A. J., Pérez-Castilla, A., Padial, P., & Haff, G. G. (2018). Prediction of the maximum number of repetitions and repetitions in reserve from barbell velocity. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(3), 353–359. <https://doi.org/10.1123/ijspp.2017-0302> 365
- García-Ramos, A., Torrejón, A., Feriche, B., Morales-Artacho, A. J., Pérez-Castilla, A., Padial, P., & Jaric, S. (2018). Selective effects of different fatigue protocols on the function of upper body muscles assessed through the force-velocity relationship. *European Journal of Applied Physiology*, 118(2), 439–447. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3786-7> 370
- 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*, 18(8), 772–781. <https://doi.org/10.1080/17461391.2014.905987> 375

Q14

- Izquierdo, M., Ibañez, J., González-Badillo, J. J., Häkkinen, K., Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., French, D. N., Eslava, J., Altadill, A., Asiain, X., & Gorostiaga, E. M. (2006). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *Journal of Applied Physiology*, *100*(5), 1647–1656. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01400.2005> 380
- Jaric, S. (2016). Two-load method for distinguishing between muscle force, velocity, and power-producing capacities. *Sports Medicine*, *46*(11), 1585–1589. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0531-z>
- Jiménez-Reyes, P., Samozino, P., Pareja-Blanco, F., Conceicao, F., Cuadrado-Penañiel, V., Gonzalez-Badillo, J. J., & Morin, J.-B. (2017). Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(1), 36–43. <https://doi.org/10.1123/IJSP.2015-0484> 385
- Kraemer, W., Noble, B., Clark, M., & Culver, B. (1987). Physiologic responses to h-resistance exercise with very short rest periods. *International Journal of Sports Medicine*, *08*(4), 247–252. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025663> 390
- Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., Sánchez-Medina, L., Mora-Rodríguez, R., González-Badillo, J. J., & Pallarés, J. G. (2019). Movement velocity as a measure of level of effort during resistance exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *33*(6), 1496–1504. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002017>
- Nóbrega, S. R., & Libardi, C. A. (2016). Is resistance training to muscular failure necessary? *Frontiers in Physiology*, *7*(10), 75–78. <https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00010> 395
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Sanchis-Moysi, J., Dorado, C., Mora-Custodio, R., Yáñez-García, J. M., Morales-Alamo, D., Pérez-Suárez, I., Calbet, J. A. L., & González-Badillo, J. J. (2016). Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, *27*(7), 724–735. <https://doi.org/10.1111/sms.12678> 400
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sanchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2014). Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance. *International Journal of Sports Medicine*, *35*(11), 916–924. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1363985> 405
- Pérez-Castilla, A., García-Ramos, A., Padial, P., Morales-Artacho, A. J., & Feriche, B. (2018). Effect of different velocity loss thresholds during a power-oriented resistance training program on the mechanical capacities of lower-body muscles. *Journal of Sports Sciences*, *36*(12), 1331–1339. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1376900>
- Pérez-Castilla, A., Jaric, S., Feriche, B., Padial, P., & García-Ramos, A. (2018). Evaluation of muscle mechanical capacities through the two-load method: Optimization of the load selection. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *32*(5), 1245–1253. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001969> 410
- Rahimi, R. (2005). Effect of different rest intervals on the exercise volume completed during squat bouts. *Journal of Sports Science & Medicine*, *4*(4), 361–366. 415
- Ratamess, N. A., Alvar, B. A., Evetoch, T. E., Housh, T. J., Ben Kibler, W., Kraemer, W. J., & Triplett, N. T. (2009). Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *41*(3), 687–708. 416
- Samozino, P., Morin, J. B., Hintzy, F., & Belli, A. (2008). A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump. *Journal of Biomechanics*, *41*(14), 2940–2945. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.07.028> 420
- Schoenfeld, B. J., Pope, Z. K., Benik, F. M., Hester, G. M., Sellers, J., Nooner, J. L., Schnaiter, J. A., Bond-Williams, K. E., Carter, A. S., Ross, C. L., Just, B. L., Henselmans, M., & Krieger, J. W. (2016). Longer intersert rest periods enhance muscle strength and hypertrophy in resistance-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *30*(7), 1805–1812. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001272> 425
- Senna, G., Salles, B. F., Prestes, J., Mello, R. A., & Simão, R. (2009). Influence of two different rest interval lengths in resistance training sessions for upper and lower body. *Journal of Sports Science and Medicine*, *8*(2), 197–202. 417

14  J. M. GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ ET AL.

- Spiering, B., Kraemer, W., Anderson, J., Armstrong, L., Nindl, B., Volek, J., & Maresch, C. (2008). 430
Resistance exercise biology: Manipulation of resistance exercise programme variables deter-
mines the responses of cellular and molecular signalling pathways. *Sports Medicine*, 38(7),
527–540. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838070-00001>
- Tan, B. (1999). Manipulating resistance training program variables to optimize maximum strength 435
in men: A review. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 13(3), 289–304. <https://doi.org/10.1519/00124278-199908000-00019>
- Weakley, J., Wilson, K., Till, K., Banyard, H., Dyson, J., Phibbs, P., Read, D., & Jones, B. (2018).
Show me, tell me, encourage me: The effect of different forms of feedback on resistance training 440
performance. *Journal of Strength and Conditioning*, 1. Advance online publication. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002887>
- Wells, G. D., Selvadurai, H., & Tein, I. (2009, September). Bioenergetic provision of energy for
muscular activity. *Paediatric Respiratory Reviews*, 10(3), 83–90. <https://doi.org/10.1016/j.prrv.2009.04.005>
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2005). A comparison of 3 different rest intervals on the exercise 445
volume completed during a workout. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 19(1),
23–26. <https://doi.org/10.1519/R-13853.1>

Q18

PROOF ONLY

■ Divulgación Científica en Congresos

Título del trabajo: **Acute and Delayed Knee Extensor Fatigue and Muscle Damage Following Resistance Training Leading or Not to Failure in Men vs Women**

Nombre del congreso: Simposio Internacional de Actualizaciones en el Entrenamiento de Fuerza

Autor de correspondencia: Si

Ciudad de celebración: Madrid, Comunidad de Madrid, España

Fecha de celebración: 14/12/2018

Fecha de finalización: 15/12/2018

Entidad organizadora: Universidad Politécnica de Madrid

Ciudad entidad organizadora: Madrid, Comunidad de Madrid, España

Jorge Miguel González Hernández; David Colomer Poveda; Asta Tvarijonaviciute; José Joaquín Cerón; Gonzalo Márquez Sánchez; Pedro Jiménez Reyes.

Título del trabajo: **Acute and Delayed Knee Extensor Fatigue and Muscle Damage Following Resistance Training Leading or Not to Failure**

Nombre del congreso: X Congreso Internacional de la Asociación Española de Ciencias del Deporte (AECCD)

Autor de correspondencia: Si

Ciudad de celebración: A Coruña, Galicia, España

Fecha de celebración: 21/11/2018

Fecha de finalización: 23/11/2018

Entidad organizadora: Instituto Nacional de Educación Física de Galicia (INEFG)

Ciudad entidad organizadora: A Coruña, Galicia, España

Jorge Miguel González Hernández; David Colomer Poveda; Asta Tvarijonaviciute; José Joaquín Cerón; Pedro Jiménez Reyes; Gonzalo Márquez Sánchez.

Título del trabajo: **Acute and Delayed Knee Extensor Fatigue and Muscle Damage Following Resistance Training Leading or Not to Failure**

Nombre del congreso: 23rd Annual Congress of the European College of Sport Science

Autor de correspondencia: Si

Ciudad de celebración: Dublin, Irlanda

Fecha de celebración: 04/07/2018

Fecha de finalización: 07/07/2018

Jorge Miguel González Hernández; David Colomer Poveda; Asta Tvarijonaviciute; Jose Joaquin Cerón; Pedro Jiménez Reyes; Gonzalo Márquez Sánchez.

Título del trabajo: **Entrenamiento de Fuerza hasta el Fallo vs No Fallo, Efectos Mecánicos, Neuromusculares y Bioquímicos**

Nombre del congreso: IV Jornadas de Investigación y Doctorado: Women in Science

Autor de correspondencia: Si

Ciudad de celebración: Murcia, Comunidad de Madrid, España Fecha de celebración: 18/05/2018

Fecha de finalización: 18/05/2018

Entidad organizadora: Universidad Católica San Tipo de entidad: Universidad Antonio de Murcia

Ciudad entidad organizadora: Murcia, Región de Murcia, España

Jorge Miguel González Hernández; David Colomer Poveda; Asta Tvarijonaviciute; José Joaquin Ceron; Pedro Jiménez Reyes.

Título del trabajo: **Response to eccentric strength of muscle damage markers in serum and saliva: Apilot study**

Nombre del congreso: X Simposio Internacional de Actualizaciones en Entrenamiento de la Fuerza

Autor de correspondencia: Si

Ciudad de celebración: Madrid, Comunidad de Madrid, España

Fecha de celebración: 15/12/2017

Fecha de finalización: 15/12/2017

Entidad organizadora: Universidad Politécnica de Madrid

Ciudad entidad organizadora: Madrid, Comunidad de Madrid, España

Jorge Miguel González hernández; Luis Manuel Martínez Aranda; David Colomer Poveda; Francisco Llorente Cantero; Asta Tvarijonaviciute; Joaquin Ceron; Gonzalo Márquez Sánchez; Pedro Jiménez Reyes.

■ Consentimientos informados

DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Efectos mecánicos, metabólicos y perceptuales agudos tras entrenamiento de fuerza tradicional vs Cluster en sentadilla

El objetivo de este estudio es medir la fatiga mecánica, metabólica y perceptual inducida tras diferentes configuraciones de la serie en el entrenamiento de fuerza. Para ello se han diseñado dos protocolos de repeticiones continuas y cuatro protocolos con tiempo de recuperación entre series.

Comenzaremos con dos semanas de familiarización en donde te ayudaremos a realizar la técnica correcta de sentadillas. Posteriormente llevaremos a cabo un test progresivo de carga para determinar los kilos que usarás durante los entrenamientos. Estos se llevarán a cabo durante tres días a la semana durante tres semanas consecutivas a la misma hora. Se realizarán mediciones de velocidad de ejecución, altura de salto, concentración de lactato capilar y percepción subjetiva del esfuerzo.

Es de esperar que el sujeto experimente dolor muscular a lo largo de estas semanas, ocasionadas por el entrenamiento de fuerza.

La correcta ejecución del ejercicio es esencial para evitar lesiones o molestias. Por lo tanto, se requiere de sujetos capaces de realizar este tipo de entrenamiento.

D/D^a:-

Da su consentimiento y se compromete para la realización de las pruebas de esta investigación y la utilización de los resultados para la misma.

Fdo:

**DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO****Valoración de marcadores de daño muscular y estrés oxidativo en sangre y saliva tras un entrenamiento de fuerza**

Una vez estudiado y aprobado por la Comisión de Investigación de la Universidad Católica San Antonio de Murcia la realización de un estudio, por parte del Grupo de Investigación NEUROMOVE perteneciente a la Universidad San Antonio de Murcia.

El objetivo de este estudio es medir y relacionar marcadores de daño muscular y de estrés oxidativo en sangre y saliva tras un entrenamiento de fuerza de carácter excéntrico en sentadilla. Para ello será necesario tomar muestras sanguíneas y de saliva basal, 24 h, 48h, 72h y 96 horas post ejercicios. A demás de estas se tomarán muestras de saliva inmediatamente tras el ejercicio, 30 minutos, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h post ejercicio, antes de dormir y al levantarse por la mañana.

Las tomas de muestras sanguíneas serán realizadas por una enfermera, profesora de la Universidad Católica San Antonio de Murcia en el laboratorio de Neuromove.

Es necesario no realizar una ingesta abundante en el desayuno previo a las extracciones sanguíneas para que no se vean alterado los marcadores a estudiar

Es de esperar que el sujeto experimente dolor muscular a lo largo de esta semana, ocasionadas por el entrenamiento de fuerza.

La correcta ejecución del ejercicio es esencial para evitar lesiones o molestias. Por lo tanto, se requiere de sujetos capaces de realizar este tipo de entrenamiento.

La investigación se llevará a cabo durante el curso escolar 2016/2017 a partir de enero 2017 en el Laboratorio de Neuromove de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, con jóvenes estudiantes que practican deporte.

D/D^a:-

Da su consentimiento y se compromete para la realización de las pruebas de esta investigación y la utilización de los resultados para la misma.

Fdo:



Cuestionario de Actividad previo a la participación en Estudio Científico



Nombre:

Código:

Protocolo:

**Pretendemos conocer tus hábitos deportivos, la actividad física realizada los 7 días previos al comienzo del estudio y en los días que participabas el mismo. Sé honesto, esta información es muy útil para nosotros. Nos ayudará a entender algunos resultados obtenidos en las mediciones.*

1. ¿Practicas algún deporte o actividad física regularmente? ¿cuál?
2. Describe que deporte, con qué frecuencia y a qué nivel entrenaste la semana previa al estudio:
3. Durante los días del estudio, ¿llegaste a entrenar algo?
4. ¿Llegaste a ir en ayunas a todas las analíticas? ¿Si no fue así en cuál no lo hiciste?
5. ¿Has tenido algún tipo de molestias durante el estudio que te condicionara en la realización de este?
6. ¿Has consumido algún tipo de suplementación que pueda alterar los resultados durante el estudio? ¿En caso de Sí, el qué?

Rellena este cuestionario y reenvíalo a la dirección jormigohe91@gmail.com
Muchas gracias por tu participación en el estudio.

**DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO****Valoración de fatiga central y periférica y marcadores de daño muscular y estrés oxidativo en sangre y saliva tras dos protocolos de fuerza**

Una vez estudiado y aprobado por la Comisión de Investigación de la Universidad Católica San Antonio de Murcia la realización de un estudio, por parte del Grupo de Investigación NEUROMOVE perteneciente a la Universidad San Antonio de Murcia.

El objetivo de este estudio es valorar la fatiga central y periférica y marcadores de daño muscular y de estrés oxidativo en sangre y saliva tras dos protocolos de fuerza en sentadilla. Para ello será necesario tomar muestras sanguíneas y de saliva basal, tras el entreno, 24 h y 48h horas post ejercicios.

Las tomas de muestras sanguíneas serán realizadas por una enfermera, profesora de la Universidad Católica San Antonio de Murcia en el laboratorio de Neuromove.

Es necesario no realizar una ingesta abundante en el desayuno previo a las extracciones sanguíneas para que no se vean alterado los marcadores a estudiar

Es de esperar que el sujeto experimente dolor muscular a lo largo de esta semana, ocasionadas por el entrenamiento de fuerza.

La correcta ejecución del ejercicio es esencial para evitar lesiones o molestias. Por lo tanto, se requiere de sujetos capaces de realizar este tipo de entrenamiento.

La investigación se llevará a cabo durante el curso escolar 2016/2017 a partir de marzo 2017 en el Laboratorio de Neuromove de la Universidad Católica San Antonio de Murcia, con jóvenes estudiantes que practican deporte.

D/D^a:-

Da su consentimiento y se compromete para la realización de las pruebas de esta investigación y la utilización de los resultados para la misma.

Fdo:



DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO



Estudio del efecto de diferentes tiempos de recuperación durante un entrenamiento de fuerza en sentadilla y press banca.

Una vez estudiada y aprobada por la Comisión de Investigación de la Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM), España, en colaboración con el Laboratorio de Evaluación del Movimiento Natural Controlado de la Universidad Católica Santísima Concepción (UCSC), se permite la realización de la investigación "*Estudio del efecto de diferentes tiempos de recuperación durante un entrenamiento de fuerza en sentadilla y press banca*", encuadrada dentro de la tesis doctoral del alumno Jorge Miguel González Hernández.

El objetivo de este estudio es valorar la fatiga mecánica tras un mismo entrenamiento de fuerza de 3 series de 6 repeticiones con un peso con el que se podrían realizar 10 repeticiones. Esto se llevará a cabo mediante la medición de la pérdida de velocidad en cada repetición, la evaluación del salto vertical con contra movimiento y press de banca lanzado.

Inicialmente se llevará a cabo una familiarización para los sujetos con el entrenamiento de sentadilla y press de banca para mejorar en la ejecución y sobre los test que se llevarán a cabo.

La correcta ejecución del ejercicio es esencial para evitar lesiones o molestias. Por lo tanto, se requiere de sujetos capaces de realizar este tipo de entrenamiento.

Es de esperar que el sujeto pueda experimentar agujetas (DOMS) o algún tipo de molestia muscular debido a la exigencia del entrenamiento. Pero lejos de lesionarse si realiza el entrenamiento como será indicado, siguiendo el calentamiento establecido y las normas de seguridad que serán descritas.

La investigación se llevará a cabo durante el curso escolar 2019 durante los meses de marzo y abril en el Laboratorio de Evaluación del Movimiento Natural Controlado de la Universidad Católica Santísima Concepción, con jóvenes estudiantes que practican deporte.

D/D^a:-

Da su consentimiento y se compromete para la realización de las pruebas de esta investigación y la utilización de los resultados para la misma.

Fdo:

■ Estancia Internacional



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION
VICERRECTORIA DE INVESTIGACION Y POSTGRADO

Carta de Invitación Pasantía Doctoral en la UCSC.



Mónica Tapia

Dra. Mónica Tapia Ladino, Vicerrectora de Investigación y Posgrado de la Universidad Católica de la Santísima Concepción invita a la Sr. **Jorge Miguel González Hernández**, pasaporte N° **78634455P**, doctorando del programa de Doctorado de la Universidad Católica San Antonio de Murcia UCAM, para realizar una pasantía de investigación como parte de su proyecto Tesis Doctoral, en el Laboratorio de Evaluación del Movimiento Natural Controlado de la Facultad de Educación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) bajo la tutoría del Dr. David Ulloa Díaz, director del Proyecto Interuniversitario de Investigación "El estudio de la fuerza muscular en el ser humano a través de la dinamometría electromecánica funcional". Los pasajes aéreos ida y vuelta, los costos de estadía y seguros de salud serán costeados por el doctorando. Durante su estancia de investigación del 01 de marzo del 2019 al 01 de junio del 2019. El doctorando, estará eximido del pago de aranceles y matrícula.

Concepción, 03 de enero de 2019
MTL/DUD/uchu



Facultad de
Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción

Dr. David Ulloa Díaz RUT 10.760.167-8, Jefe de Departamento de Ciencias del Deporte y Acondicionamiento Físico, de la Facultad de Educación, de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, da constancia que Don Jorge Miguel González Hernández, DNI 78634455P, ha realizado una estancia de investigación predoctoral en la Universidad Católica de la Santísima Concepción (UCSC) de Chile desde el 1 de marzo al 15 de junio del 2019.

Durante su estancia en nuestra institución el Sr. González, ha desarrollado dos proyectos de investigación de su tesis doctoral, bajo la tutela del profesor Dr. Amador García Ramos, el primer proyecto consintió en estudiar "La fatiga producida al variar el tiempo de recuperación durante un entrenamiento de fuerza", y el segundo en "Comparar las adaptaciones producidas tras seis semanas de entrenamiento de fuerza a través del método tradicional y método cluster". Desempeñando tareas de diseño del estudio, organización de sujetos, evaluaciones, recogida de datos, análisis de resultados y redacción de artículos científicos. Así también, ha participado activamente en el diseño, evaluación y escritura de otros estudios propios de nuestro grupo de investigación, relacionados con el entrenamiento de fuerza, velocidad de ejecución y perfil fuerza-velocidad.

En el ámbito de la docencia, ha dictado un seminario a los estudiantes de quinto y séptimo semestre de las asignaturas de Entrenamiento Deportivo I y II, de la carrera de Pedagogía en Educación Física, con el título "Seminario nuevas tendencias en el entrenamiento de Fuerza Personalizado".

Hago constancia de ello,


Dr David Ulloa



