



universidad
de león

TESIS DOCTORAL

**EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO INTERVALADO DE ALTA
INTENSIDAD SOBRE PARÁMETROS FISIOLÓGICOS,
NEUROMUSCULARES Y PERCEPTIVOS DEL RENDIMIENTO:
OPTIMIZACIÓN DE LA CARGA DE ENTRENAMIENTO BASADA EN
EL INTERVALO DE TRABAJO Y LA ESPECIFICIDAD DEPORTIVA**

Doctorando:

Diego Martín Warr di Piero

Programa de Doctorado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte

Directores:

Dr. Juan Carlos Redondo Castán

Dr. Carlos Pablos Abella

León, 2022.



El Dr. Juan Carlos Redondo Castán, Profesor Titular de Universidad del Departamento de Educación Física y Deportiva de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de León, y el Dr. Carlos Pablos Abella, Profesor jubilado, de la Universidad de Católica de Valencia “San Vicente Mártin”.

Hacen constar:

Que la tesis doctoral titulada “Efectos del entrenamiento intervalado de alta intensidad sobre parámetros fisiológicos, neuromusculares y perceptivos del rendimiento: optimización de la carga de entrenamiento basada en el intervalo de trabajo y la especificidad deportiva” de la que es autor D. Diego Martín Warr di Piero ha sido realizada bajo nuestra dirección y cumple las condiciones formales y académicas exigidas por la legislación vigente para optar al título de Doctor por la Universidad de León, por lo que autorizan su presentación, mediante compendio de publicaciones, a fin de que pueda ser defendida ante el tribunal correspondiente.

Y para que así conste, y a los efectos oportunos, expedimos el presente certificado en Salamanca a 21 de febrero de 2022.

Dr. Juan Carlos Redondo Castán

Dr. Carlos Pablos Abella

A la memoria de mi padre, ejemplo de bondad y sabiduría...

“There are no uninteresting things, only uninterested people”

(G.K. Chesterton)

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de la presente tesis doctoral no hubiese sido posible sin el apoyo y la colaboración de varias personas, a quienes les expreso mis más sinceros agradecimientos.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores, el Dr. Carlos Pablos Abella y el Dr. Juan Carlos Redondo Castán, por haber confiado en el proyecto desde un primer momento y permitirme el privilegio de contar con su honestidad y experiencia durante todo el proceso de la tesis. Ellos me han brindado los consejos correctos, en las instancias oportunas.

Agradezco a la Universidad de León, particularmente a la Escuela de Doctorado y la Comisión Académica del Programa en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, por haberme admitido en el mismo.

Quiero hacer un agradecimiento especial al Dr. José Vicente Sánchez-Alarcos Díaz-Pintado, por su compromiso y disposición en los proyectos que hemos llevado adelante.

Agradezco también, a los investigadores con los que he podido compartir actividades desde mi llegada a España, la Dra. Ana María de Benito, la Dra. Ana Pablos, la Dra. Teresa Valverde, el Dr. Florentino Huertas y los miembros del Grupo de Investigación en Actividad Física, Rendimiento y Calidad de Vida, de la Universidad Católica de Valencia “San Vicente Mártir”.

Hago extensivo mi agradecimiento a aquellos docentes e investigadores que he tenido como referencia a lo largo de mi formación, el Dr. Adrián Casas, el Dr. Fernando Naclerio Ayllón, el Prof. Gustavo Calvo y el Prof. José María Alurralde (†).

A todos los compañeros e instituciones con los que he compartido mi vida profesional, en especial al Centro de Rehabilitación Integral APREPA.

A los atletas y clubes deportivos que han participado en los estudios, por hacer posible, con su esfuerzo, el desarrollo de esta tesis.

A mi amigo Lucas y su familia, por su ayuda sincera y los momentos compartidos.

Por último, quiero agradecer profundamente a mi familia. A mi amada esposa, Natalia, por los veinticuatro años que llevamos juntos, a mis hijos, Mercedes y Santiago, por ser la luz que ilumina mi vida, a madre, Nancy, por su entusiasmo permanente y a mi hermano Matías.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PUBLICACIONES	I
RESUMEN	II
ABSTRACT AND CONCLUSIONS	IV
ABREVIATURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Entrenamiento Intervalado de Alta Intensidad	1
1.1.1. Componentes de la Carga de HIIT.....	1
1.2. Respuestas Fisiológicas y Perceptivas Agudas en protocolos de HIIT.....	5
1.2.1. Sistemas de aporte de energía durante esfuerzos intervalados.....	5
1.2.2. Parámetros de monitorización del ejercicio intervalado	5
1.3. Valoración de la Fatiga Neuromuscular mediante Pruebas de Salto	8
1.3.1. Salto contramovimiento (CMJ).....	8
1.3.2. Fuerza de Reacción Vertical (VGRF).....	9
1.1.2. Cálculo de Variables de Rendimiento.....	9
1.3.3. Puntos clave	10
1.3.4. Determinación de las Fases del CMJ	11
1.3.5. Análisis del CMJ por subfases.....	11
1.3.6. Fiabilidad de las variables de rendimiento en plataforma de fuerzas.....	12
1.3.7. El CMJ como parámetro de monitorización del HIIT.....	13
1.4. Clasificación de las Disciplinas deportivas en base a los requerimientos físicos	13
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	15
2.1. Justificación del Estudio.....	15
2.2. Objetivos e Hipótesis.....	15
2.3. Desarrollo Metodológico	17
3. COMPENDIO DE PUBLICACIONES.....	18
3.1. Artículo I	18
3.2. Artículo II	20
3.3. Artículo III.....	22
4. CONSIDERACIONES FINALES.....	24
4.1. Verificación de Hipótesis	24
4.2. Alcances, Limitaciones y Propuestas para Futuros Estudios.....	25
4.3. Conclusiones.....	26
5. BIBLIOGRAFÍA.....	27

PUBLICACIONES

Los estudios realizados durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, han posibilitado la publicación de los siguientes artículos:

- **Artículo I:**

Warr D.M., Valverde-Esteve T, Redondo J.C, Pablos C, & Sánchez- Alarcos JV (2018). Effects of work- interval duration and sport specificity on blood lactate concentration, heart rate, and perceptual responses during high intensity interval training. *PLoS ONE 13(7)*: e0200690. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200690>

- **Artículo II:**

Warr, D. M., Pablos, C., Sánchez-Alarcos, J. V., Torres, V., Izquierdo, J. M., & Redondo, J.C. (2020). Reliability of measurements during countermovement jump assessments: Analysis of performance across subphases. *Cogent Social Sciences*, 6(1), 1843835. <https://doi.org/10.1080/23311886.2020.1843835>

- **Artículo III:**

Warr, D. M., Sánchez-Alarcos, J. V., Pablos, C. & Redondo, J.C. (2022). Analysis of the neuromuscular responses during two different High-Intensity Interval Training sessions in athletes of cyclic and acyclic sports. *Cultura, Ciencia y Deporte, Accepted*.

RESUMEN

El entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIIT) ha demostrado ser un método efectivo para la mejora de la resistencia, generando mayores incrementos, en indicadores máximos y sub-máximos del rendimiento, que métodos continuos de moderada o baja intensidad. Este hecho se basa en los distintos efectos que produce el fraccionamiento de la carga sobre la respuesta al ejercicio. Sin embargo, es necesaria una precisa modulación de los componentes de la carga, a fin optimizar las sesiones de HIIT e incrementar su efectividad. La presente tesis doctoral profundiza sobre los aspectos metodológicos de estos formatos y su influencia en los parámetros de monitorización del ejercicio. Específicamente, analiza los efectos de la duración del intervalo de trabajo sobre la frecuencia cardíaca, el lactato sanguíneo, la percepción subjetiva del esfuerzo y el estatus neuromuscular, en relación con la disciplina deportiva.

Para llevar a cabo la misma, hemos realizado una revisión de la literatura sobre el tema e identificado algunos aspectos que aún no habían sido suficientemente esclarecidos. Al respecto, el primer punto que presentaba cierta controversia era la categorización de un protocolo HIIT en base a la duración del intervalo de trabajo (corto o largo). Este aspecto ha sido abordado en el estudio 1, donde comparamos las respuestas metabólica, cardíaca y perceptiva, entre cuatro sesiones HIIT de igual magnitud de carga, pero con diferente duración del intervalo de trabajo (10 s, 50 s, 90 s y 130 s). Los resultados de este estudio nos han permitieron categorizar los formatos de fraccionamiento en base a las respuestas observadas en cada sesión.

Un segundo punto en el cual no constatamos consensos en la literatura, se remite a los criterios para la determinación del volumen total recomendado para sesiones de HIIT. Sobre esta base, tanto en los estudios 1 y 3, hemos establecido la utilización de un indicador individualizado, como es el volumen total relativo al tiempo límite hasta la extenuación, alcanzado en una valoración previa.

El tercer aspecto identificado fue la escasa evidencia relacionada a la respuesta neuromuscular durante la ejecución de sesiones de HIIT, particularmente, entre sesiones de entrenamiento regulares no ejecutadas hasta el agotamiento y sus efectos sobre parámetros específicos asociados a las subfases del CMJ. Para abordar este punto realizamos, en primera instancia, un estudio (estudio 2) para determinar la fiabilidad de las variables de rendimiento del CMJ mediante una prueba de ensayos repetidos de cuatro sesiones y un análisis por sub-fases de la ejecución. Así pudimos establecer las medidas de mayor fiabilidad que podrían utilizarse como indicadores para la detección de fatiga neuromuscular, durante la ejecución de sesiones de HIIT (estudio 3).

El último aspecto encontrado fue la falta de estudios en donde se analizaran posibles diferencias en los parámetros de monitorización del HIIT, vinculadas a la especificidad de la disciplina deportiva. En esta línea, hemos incluido en los análisis estadísticos realizados en los estudios 1 y 3, la disciplina deportiva como factor intersujetos, permitiendo así constatar, si se observaba un efecto de interacción entre este factor y el tipo de fraccionamiento.

Los resultados obtenidos en el presente compendio de estudios indican que las sesiones de HIIT con fraccionamientos cortos, implican intervalos de trabajo inferiores al minuto, mientras que las sesiones con fraccionamientos largos, superiores a los 90 segundos. También indican que el

EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO INTREVALADO DE ALTA INTESIDAD SOBRE PARÁMETROS FISIOLÓGICOS, NEUROMUSCULARES Y PERCEPTIVOS DEL RENDIMIENTO

volumen relativo acumulado puede utilizarse como criterio válido para la programación de una sesión de HIIT. Asimismo, permiten establecer la fiabilidad de las variables del rendimiento del CMJ por subfases, y constatar que el estatus neuromuscular está condicionado por el volumen relativo acumulado pero no por el tipo de fraccionamiento implementado. Finalmente, sugieren que la respuesta aguda observada en sesiones de HIIT con distintos fraccionamientos, es independiente al perfil funcional de la disciplina.

ABSTRACT AND CONCLUSIONS

High- Intensity Interval Training (HIIT) has shown to be an effective method to improve endurance. It has been demonstrated that HIIT generates higher increases in maximal and submaximal performance parameters than continuous methods of low or moderate intensity. This fact is based on the different effects observed on the exercise responses, due to the partition of the training load. However, a precise modulation of the load components is necessary to optimize HIIT sessions and increase its effectivity. The present doctoral thesis deepens upon the methodological aspects of these formats, and the influence on the parameters used to monitor exercise responses. Specifically, it analyzes the effects of work-interval duration on heart rate, blood lactate concentration, rate of perceived exertion, and neuromuscular status, in relationship with the sport disciplines.

To develop this thesis, we have completed a literature review on the topic, and identified several aspects that had not been sufficiently clarified. The first issue that presented some controversies was the categorization of a HIIT protocol as short or long, based on the work-interval duration. This aspect was addressed in the study 1, in which we compared the metabolic, cardiac, and perceptual responses, among four HIIT sessions of equal load but different work-interval duration (10 s, 50 s, 90 s, and 130 s). The findings of this study allowed us to define the interval formats based on the responses observed in each session.

The second point that showed no consensus in the literature was related to the criteria to determine the total volume recommended for HIIT sessions. In this line, in the studies 1 and 3, we have established an individualized parameter based on the time to exhaustion reached in a previous test.

The third aspect identified was scant evidence associated to the neuromuscular responses during HIIT sessions. In particular, no studies had compared the neuromuscular status among regular HIIT sessions not conducted until exhaustion, and the specific effects on countermovement jump (CMJ) sub-phases. To address this point, we initially completed a study (study 2) to assess the reliability of measures of the CMJ performance variables, during a four-sessions repeated measures trials, and analyzed across the different sub-phases of the execution. This allowed us to establish the measures of higher reliability that would be used as parameters for the detection of neuromuscular fatigue during the completion of different HIIT sessions (study 3).

The last aspect found was the lack of studies aimed to analyze the possible differences in the parameters to monitor HIIT associated to the specificity of the sport disciplines. For this purpose, in the statistical analyses of the studies 1 and 3 we have included the type of the sport discipline as inter-subject factor. In this way, we could contrast if an interaction between this factor and the type of protocols was observed.

The results of the present compendium indicate that HIIT sessions with short work-interval duration entail efforts lower than one minute, while HIIT sessions with long work-interval duration above 90 seconds. They also indicate that the relative accumulated volume may be used as a valid criterion to design HIIT sessions. Furthermore, they allow establish the reliability of measures of the CMJ performance variables for the different sub-phases, and determine that the neuromuscular status is conditioned by the relative total volume accumulated, but not by the type of work-interval duration implemented. Finally, the present

findings suggest that the acute responses observed during HIIT sessions with different work-interval duration, are independent to the functional profile of the sport discipline.

Based on the mention results we can state the present conclusions:

- The work-interval duration determines the metabolic and perceptual responses during HIIT sessions.
- HIIT with short work-interval duration (< 60 s) generate low blood lactate concentrations ($\approx 3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), and a moderate rate of perceived exertion.
- HIIT with long work-interval duration produce high blood lactate concentrations ($\approx 7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) and a strong rate of perceived exertion, indicating a major participation of the glucolytic pathway for the energy generation.
- The performance observed in a time to exhaustion test may be used as a valid criterion to determine the total volume of a HIIT session.
- The neuromuscular fatigue associated to the completion of a given HIIT session may be detected through the analysis of the sub-phases of the CMJ test.
- During HIIT sessions, the neuromuscular status is not affected by the type of work-interval duration selected.
- The total relative volume of a HIIT session diminishes the neuromuscular performance when is equivalent to three times the distance reached in a previous time to exhaustion test.
- The sport specificity and the characteristics of the physical demands of the studied disciplines do not condition the metabolic, perceptual, and neuromuscular responses expected during HIIT sessions with different work-interval duration, and volumes.

ABREVIATURAS

ATP: Trifosfato de adenosina (Adenosine triphosphate).
CMJ: Salto contramovimiento (Countermovement jump).
CV: Coeficiente de variación (Coefficient of variation).
D_{MAX}: Amplitud del contra movimiento (Countermovement amplitude).
FC: Frecuencia cardíaca (HR: Heart rate).
FC_{MAX}: Frecuencia cardíaca máxima (HR_{MAX}: Maximal heart rate).
FC_{MEDIA}: Frecuencia cardíaca media (HR_{MEAN}: Mean heart rate).
FC_{PICO}: Frecuencia cardíaca pico (HR_{PEAK}: Peak heart rate).
FC_{REC}: Frecuencia cardíaca de recuperación (HR_{REC}: Recovery heart rate).
FC_W: Frecuencia cardíaca de trabajo (HR_{WORK}: Work heart rate).
F_{MIN}: Fuerza mínima (Minimum force).
F_{START}: Fuerza inicial (Starting force).
FT: Tiempo de vuelo (Flight time).
HIIT: Entrenamiento intervalado de alta intensidad (High intensity interval training).
ICC: Coeficiente de correlación inter clase (Inter-class correlation coefficient).
PF: Pico de fuerza (Peak force).
P_{MIN}: Potencia mínima (Minimum power).
PP: Pico de potencia (Peak power).
PV: Pico de velocidad (Peak velocity).
RFD: Ratio de desarrollo de fuerza (Rate of force development).
RPE: Ratio de percepción de esfuerzo (rating of perceived exertion).
VAM: Velocidad aeróbica máxima (MAS: Maximal aerobic speed).
VGRF: Fuerza de reacción vertical al suelo (Vertical ground reaction force).
V_{MIN}: Velocidad mínima (Minimum velocity).
VO₂ MAX: Consumo máximo de oxígeno (Maximal oxygen uptake).
V_{PP}: Velocidad en el pico de potencia (Velocity at peak power).

ÍNDICE DE TABLAS

Introducción

Tabla 1. Rangos de los componentes de la carga de HIIT.....	4
---	---

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Entrenamiento Intervalado de Alta Intensidad

El entrenamiento intervalado de alta intensidad (HIIT, por sus siglas en inglés), es un método utilizado para la mejora de la resistencia, basado en la repetida sucesión de esfuerzos de corta a larga duración, ejecutados a una alta intensidad relativa e intercalados con períodos de recuperación entre los mismos (Buchheit & Laursen, 2013; Laursen & Jenkins, 2002; Tschakert & Hofmann, 2013). El HIIT ha demostrado mayor efectividad para generar incrementos en indicadores de rendimiento máximos y submáximos, comparado con métodos continuos de moderada o baja intensidad (Buchan et al., 2011; Seiler, Jøranson, Olesen, & Hetlelid, 2013). Este hecho estaría posiblemente asociado a que el fraccionamiento de la carga permite una mantener durante más tiempo valores cercanos al consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) respecto a esfuerzos continuos (Billat et al, 2000; Zafeiridis et al., 2015). Asimismo, se ha reportado una mayor satisfacción referida, con un consecuente aumento en la adherencia a programas de ejercicio, en 9 de cada 10 participantes quienes prefirieron los formatos de HIIT por sobre los continuos, a pesar del mayor estrés metabólico de los primeros (Thum, Parsons, Whittle, & Astorino, 2017).

Por lo tanto, profundizar en los aspectos metodológicos de la configuración del HIIT y sus efectos sobre la respuesta funcional a los mismos, constituye un factor importante para garantizar una adecuada prescripción de este método y optimizar el impacto de la carga implementada.

1.1.1. Componentes de la Carga de HIIT

Las repuestas agudas y las consecuentes adaptaciones generadas, están condicionadas por el tipo del protocolo HIIT que se implemente (Tschakert & Hofmann, 2013). La manipulación de alguno de los componentes de la carga impactará directamente sobre la respuesta metabólica y cardiopulmonar, desencadenando efectos específicos que permitirán orientar el entrenamiento hacia la dirección adecuada, en base a los objetivos del programa. Sin embargo, cuando más de uno de los componentes de la carga son manipulados simultáneamente, las respuestas son más difíciles de predecir, debido a la interrelación de los mismos (Buchheit & Laursen, 2013).

Estudios previos han identificado múltiples componentes vinculados al diseño de la carga de HIIT (Buchheit & Laursen, 2013; Hader, Mendez-Villanueva, Ahmaidí, Williams, & Buchheit, 2014; Tschakert & Hofmann, 2013; Tschakert et al., 2015) de los cuales, los principales se desarrollan a continuación.

1.1.1.1. Intensidad del intervalo de trabajo

Tal y como se desprende del mismo nombre, el componente de intensidad de ejecución del HIIT debe ser elevado. Esto implica que debe alcanzar determinado umbral para poder considerarse de alta intensidad pero, a su vez, sin sobrepasar un umbral máximo que implique incursionar en otros métodos fraccionados de alta intensidad (p.e. entrenamiento de aceleraciones repetidas). Respecto a al umbral mínimo, se han reportado protocolos intervalados a una intensidad un 5% superior al umbral láctico, que equivaldría al $\approx 86\%$ de la velocidad aeróbica máxima (VAM) (Dittrich, de Lucas, Beneke, & Guglielmo, 2014), e

inclusive al 80% de la VAM (Seiler & Sjørnsen, 2004); el umbral máximo de una sesión de HIIT se sitúa en torno del 140% de la VAM (Buchheit & Laursen, 2013; Dupont, Blondel, Lensel, & Berthoin, 2002). En términos generales, una intensidad de trabajo cercana a la VAM, que oscile entre el 100% y el 120% de la misma, parece ser la indicada para garantizar el estímulo necesario y la activación de los mecanismos fisiológicos involucrados en el HIIT (Billat et al., 2000; Price & Moss, 2007; Rozenek, Funato, Kubo, Hoshikawa, & Matsuo, 2007; Wakefield & Glaister, 2009). Es importante resaltar que si dos protocolos aplican intensidades distintas, las respuestas fisiológicas serán diferentes, aunque ambas se enmarquen dentro del rango indicado. En tal sentido Wakefield y Glaister (2009) compararon el consumo de oxígeno y la concentración de lactato sanguíneo entre protocolos intervalados al 105% y 115% de la VAM, reportando valores de lactato significativamente más elevados en el protocolo de mayor intensidad. De manera similar, Dupont et al. (2002) analizaron la respuesta en los parámetros ventilatorios entre protocolos intermitentes hasta la extenuación, ejecutados a diferentes intensidades (110%, 120%, 130% y 140% de la VAM) y sus resultados revelaron un tiempo de mantenimiento del VO_{2max} significativamente mayor durante el protocolo al 120% de la VAM que en el resto de intensidades.

1.1.1.2. Intensidad del intervalo de recuperación

La actividad que se desarrolle durante las pausas determinará el formato de las mismas. Este puede ser pasivo, en donde la recuperación implica el cese total del esfuerzo (Dupont et al., 2002; Price & Moss, 2007; Wakefield & Glaister, 2009; Zafeiridis et al., 2015), activo, en el cual la recuperación consiste en una disminución de la intensidad de ejecución a valores entre el 50% y el 84% de la VAM) (Rozenek et al., 2007; Billat et al., 2000; Thevenet et al., 2008) o libre (donde el atleta puede elegir que acción realiza durante la pausa) (Seiler & Sjørnsen, 2004). La selección de uno u otro formato puede tener incidencia en las respuestas ventilatorias, así como en el rendimiento total expresado como tiempo hasta la extenuación. Sobre este punto, Dupont y Berthoin (2004) determinaron un tiempo hasta la extenuación significativamente mayor en la condición de recuperación pasiva respecto a la activa (50% VAM) aunque sin diferencias en el tiempo de mantenimiento de una tasa $\geq 90\%$ VO_{2max} . Otro estudio (Thevenet et al., 2008) examinó los efectos de tres diferentes intensidades de recuperación, equivalentes al 84%, 67% y 50% de la VAM durante esfuerzos intermitentes de 30 por 30 segundos, concluyendo que la intensidad de recuperación más baja parecía ser la mejor opción para inducir una sollicitación substancial del sistema aeróbico. Asimismo cabe destacar que la utilización de recuperaciones pasivas ha sido recomendada para la programación de sesiones de HIIT en deportistas que no sean atletas de resistencia, como pueden ser los jugadores de deportes de equipo (Buchheit & Laursen, 2013).

1.1.1.3. Duración del intervalo de trabajo

El tiempo requerido para completar cada una de las repeticiones que componen una sesión de HIIT, constituye la duración del intervalo de trabajo. Dicho tiempo puede oscilar entre esfuerzos muy cortos, de menos de 10 segundos (Price & Moss, 2007), de duración intermedia, entre 15 a 60 segundos (Billat et al., 2000; Rozenek et al., 2007; Thevenet et al., 2008; Wakefield & Glaister, 2009), o largos, \approx 2 minutos (Zafeiridis et al., 2015), llegando inclusive hasta repeticiones superiores a los 5 minutos (Dittrich et al., 2014; Seiler & Sjørnsen, 2004). La duración del intervalo de trabajo, repercutirá sensiblemente en los parámetros fisiológicos y perceptivos que se observarán durante la ejecución de una sesión de HIIT. En esta línea,

diversos estudios han comparado las respuestas entre protocolos con intervalos de trabajo de diferente duración. Por ejemplo, en esfuerzos cortos Price y Moss (2007) demostraron que intervalos de trabajo de 24 segundos provocaban un estrés metabólico y perceptivo mayor que intervalos de 6 segundos. En esfuerzos de duración intermedia, Wakefield y Glaister (2009) determinaron que el tiempo total alcanzado a una tasa de consumo de oxígeno $\geq 95\%$ VO_{2max} y la concentración de lactato sanguíneo eran significativamente mayores en series de 30 s versus series de 25 s y 20 s, en sesiones intermitentes supramáximas hasta el agotamiento. Estos resultados son similares a los de Rozenek et al. (2007), quienes reportaron valores más elevados en las mismas variables y en la frecuencia cardíaca (FC) media porcentual y el ratio de percepción de esfuerzo (RPE) para duraciones en 30 y 60 segundos comparadas con el protocolo de 15 segundos. También se han analizado las respuestas entre intervalos cortos (30 s) y largos (2 min), observándose un VO_{2max} significativamente mayor en los últimos, aunque sin diferencias significativas en el lactato sanguíneo y la FC (Zafeiridis et al., 2015). En protocolos con intervalos de larga duración, Seiler & Sjursen, (2004) constataron una disminución en la velocidad de carrera conforme aumentaba la duración de los intervalos y una mayor FC pico porcentual en los protocolos con intervalos de 4 y 6 minutos, respecto a los de 1 y 2 minutos. En este estudio la intensidad era autorregulada por los participantes, lo que implicó que no se observaran diferencias significativas entre protocolos para la RPE y la concentración de lactato sanguíneo.

1.1.1.4. Densidad

La densidad es la relación entre el trabajo y la recuperación, expresado como el ratio del tiempo de trabajo y el tiempo de recuperación ($t_{trabajo} : t_{recuperación}$). Las densidades más frecuentes dentro de las configuraciones de HIIT, contemplan ratios entre 1:1 y 1:1.5 (Billat et al, 2000; Price & Moss, 2007; Zafeiridis et al., 2015), pudiéndose encontrar ratios hasta de 5:1 (Dittrich et al., 2014). La variación del ratio de densidad, también tendrá efectos sobre las respuestas fisiológicas en sesiones de HIIT. Al respecto, se ha demostrado que ratios de 2:1 y 4:1 generan mayor estrés cardiorrespiratorio, metabólico y perceptivo, que un ratio de 1:1, una intensidad del 100% de la VAM (Rozenek et al., 2007). Debe señalarse que la selección de uno u otro ratio está generalmente asociada al resto de los componentes de la carga, de modo que a mayor intensidad y/o mayor duración del intervalo de trabajo, la densidad disminuye a favor de la recuperación, mientras que a menor intensidad y/o menor duración del intervalo de trabajo, la densidad aumenta en cuanto al tiempo de trabajo (Tschakert & Hofmann, 2013). La aplicación de un tiempo de recuperación fijo también ha sido propuesta (Tschakert et al., 2015). Sin embargo, cuando se aplica un tiempo de recuperación fijo en intervalos de trabajo de diferente duración (Wakefield & Glaister, 2009), el ratio de densidad se modifica *per se* y, por tanto, las respuestas observadas estarán influenciadas por este hecho, además de los efectos propios asociados a los otros componentes de la carga (intensidad y duración).

1.1.1.5. Volumen

En primer lugar, es necesario aclarar que este término puede hacer referencia a distintos conceptos vinculados a la carga total de trabajo. El mismo puede usarse para definir la totalidad de una carga de entrenamiento dada (Stöggl & Sperlich, 2014; Seiler et al., 2013), en donde se consideren los valores absolutos de todos los esfuerzos realizados durante la misma (p.e. minutos totales); o bien, la carga específica de trabajo aplicada dentro del contexto de una sesión (p.e. minutos por intensidad) (Buchheit & Laursen, 2013; Rozenek et al., 2007). A su vez, el

volumen puede ser expresado mediante unidades de tiempo o de distancia, las cuales pueden utilizarse indistintamente, siempre y cuando la intensidad de ejecución sea constante.

En consecuencia, el volumen de una sesión de HIIT lo definiremos como la distancia o tiempo totales, correspondientes a la sumatoria de todos los intervalos de trabajo completados. De este modo, dos sesiones de HIIT pueden involucrar el mismo volumen de trabajo a intensidad específica, y aun así completarse en un intervalo total de tiempo distinto, debido a la interacción con otros componentes, como la densidad (Rozenek et al., 2007). Dicho tiempo o distancia a intensidad específica es el que permitirá que se activen los mecanismos metabólicos y cardiorrespiratorios conducentes a la mejora del rendimiento, por lo tanto, una correcta determinación del volumen de HIIT optimizará los resultados del programa de entrenamiento (Buchheit & Laursen, 2013). Si bien existe cierto consenso, que resalta el bajo volumen de las configuraciones de HIIT como un factor decisivo al considerar los beneficios respecto a otros métodos (Buchan et al., 2011; Buchheit & Laursen, 2013; Foster et al., 2015; Seiler et al., 2013; Tschakert & Hofmann, 2013), no hay un criterio uniforme para determinar dicho volumen.

En este sentido, algunos estudios han propuesto valores fijos preestablecidos, dentro de un rango que comprende volúmenes de ≈ 9 minutos (Menz et al., 2019; Price & Moss, 2007; Rozenek et al. 2007), de ≈ 16 minutos (Stöggl & Sperlich, 2014; Tschakert et al., 2015) y de ≈ 24 minutos (Seiler & Sjursen, 2004; Seiler et al., 2013). En una reciente revisión con meta-análisis, tendiente determinar los efectos de programas de HIIT en pruebas de rendimiento, Rosemblat, Perrota, & Thomas (2020) acotan dicho rango a volúmenes entre 19 y 29 minutos. Otros estudios plantean un volumen variable determinado por el tiempo en que el atleta puede tolerar el trabajo sin disminuir la intensidad. Los valores reportados son similares a los mencionados anteriormente, pudiéndose encontrar volúmenes entre 6 a 27 minutos (Billat et al, 2000; Dupont et al., 2002; Thevenet et al., 2008) para intensidades superiores al 100% de la VAM y entre 30 y 60 minutos, en intensidades cercanas al umbral láctico (Dittrich et al., 2014; Seiler et al., 2013; Stöggl & Sperlich, 2014).

Una síntesis con los rangos de los componentes de las carga, para distintas configuraciones de HIIT es presentada en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos de los componentes de la carga de HIIT.

Intensidad (% VAM)	Duración del Intervalo de trabajo (s)	Densidad (s:s)	Volumen (min)
80 90	120 a 300	4:1 a 5:1	30 a 60
100 110 120	10 a 120	1:1 a 1:2	15 a 30
130 140	6 a 30	1:1 a 1:3	3 a 8

1.2. Respuestas Fisiológicas y Perceptivas Agudas en protocolos de HIIT

1.2.1. *Sistemas de aporte de energía durante esfuerzos intervalados*

Se ha identificado la participación de distintos sistemas metabólicos para la resíntesis de ATP durante la realización de HIIT. En las fases iniciales, o cuando se aplican esfuerzos de corta duración, los valores de oxígeno transportado por el sistema circulatorio hacia los músculos en trabajo, no se corresponde con la demanda requerida por los mismos. Por lo tanto, en estas situaciones, la energía requerida para la resíntesis de ATP se encuentra predominantemente asociada a fosforilación oxidativa, resaltando la importancia de las reservas de oxihemoglobina y fosfocreatina (Buchheit & Laursen, 2013b; Laursen & Jenkins, 2002; Tschakert & Hofmann, 2013). Estas reservas son utilizadas durante el esfuerzo, y pueden ser rápida y completamente restituidas durante los intervalos de recuperación (Buchheit & Laursen, 2013). A medida que el esfuerzo se prolonga, o ante un incremento de la intensidad, se requiere el aporte del sistema glucolítico, con una mayor o menor participación de oxígeno, reflejada en los parámetros ventilatorios o en la presencia de metabolitos en sangre (Buchheit & Laursen, 2013; Christmass, Dawson, Goodman, & Arthur, 2001; Tschakert & Hofmann, 2013). El estrés fisiológico vinculado a una u otra vía metabólica estará condicionado por el formato del HIIT, el cual, a su vez, debe adecuarse a los objetivos del programa. En esta línea, una precisa monitorización de las respuestas observadas durante las sesiones, ratificará que los parámetros del ejercicio son los esperados para la carga aplicada.

1.2.2. *Parámetros de monitorización del ejercicio intervalado*

1.2.2.1. *Consumo de Oxígeno*

Las intensidades cercanas al VO_{2max} permiten un mayor reclutamiento de unidades motoras y una repuesta cardíaca máxima que, en conjunto, activaran los señalizadores musculares para la adaptación oxidativa de la fibra muscular y la mejora miocárdica (Altenbur, Degens, van Mechelen, Sargeant, & de Haan, 2007; Buchheit & Laursen, 2013). De este modo se puede lograr un incremento en el VO_{2max} , como consecuencia del entrenamiento. Para ello, es importante que el régimen de HIIT permita alcanzar al menos el 90% del VO_{2max} y, además, conlleve a un mantenimiento de ese porcentaje durante un tiempo prolongado (≈ 10 min) (Billat et al, 2000; Buchheit & Laursen, 2013). Al respecto, y considerando que una vez iniciado un esfuerzo es necesario un tiempo mínimo para alcanzar el porcentaje de VO_2 buscado, la duración del intervalo de trabajo cobra un papel relevante. Se ha enfatizado que los esfuerzos de larga duración permitirían alcanzar un $\%VO_{2max}$ más elevado y un mayor tiempo de mantenimiento del mismo, respecto a esfuerzos de corta duración (Buchheit & Laursen, 2013; Rozenek et al., 2007; Wakefield & Glaister, 2009; Zafeiridis et al., 2015). Sin embargo, hay evidencia que sugiere que las mejoras en la capacidad oxidativa periférica muscular, y consecuentemente en el VO_{2max} , está relacionada con la intensidad del ejercicio, y por lo tanto también es esperable con esfuerzos cortos (Egan et al., 2010; Tschakert & Hofmann, 2013). De esta forma la elevada intensidad del HIIT, es la que garantiza la activación de los mecanismos responsables de la mejora en la capacidad de consumo de oxígeno, independientemente del intervalo de trabajo seleccionado. La selección de un formato con intervalos de trabajo cortos o largos, dependerá entonces, de los objetivos del programa, la modalidad deportiva o el status

funcional del atleta (Buchheit & Laursen, 2013). La medición del VO_2 durante el HIIT, proporciona un indicador preciso y fiable de la respuesta ventilatoria, aunque presenta algunas limitaciones vinculadas a la accesibilidad a los dispositivos, la incomodidad que puede representar su uso para el atleta, y la inviabilidad de supervisar a varios deportistas simultáneamente.

1.2.2.2. *Lactato Sanguíneo*

La concentración de lactato sanguíneo ha probado ser un indicador efectivo para monitorizar la respuesta metabólica en formatos de ejercicios continuos. Su utilización se basa en la previa determinación de los puntos de cambio o umbrales durante una prueba incremental (Borresen & Lambert, 2009; Dalleck et al., 2010; Richard et al., 2004). Cuando la intensidad es baja, el lactato producido en los músculos involucrados es eliminado aeróbicamente dentro de los mismos, estableciéndose un balance entre la producción y eliminación, denominado “estado estable” (*steady state*), en este caso a nivel muscular. A medida que aumenta la intensidad, el lactato producido, no puede ser oxidado completamente dentro del músculo esquelético (primer umbral), por lo que es vertido al torrente sanguíneo y transportado para su metabolización en otros órganos. En esta situación también encontramos un estado estable del lactato, pero a nivel sistémico. Si la intensidad continúa aumentando y la producción de lactato es superior a la que puede ser conjuntamente eliminada a nivel muscular y sistémico (segundo umbral), se rompe el balance del estado estable, lo que resulta en una acumulación de lactato en la sangre (Tschakert & Hofmann, 2013). Si bien en los protocolos de HIIT, la intensidad se encuentra por arriba del segundo umbral láctico, diversos estudios han reportado un estado estable del lactato, durante la ejecución de esfuerzo intervalados de corta duración (Price & Moss, 2007; Tschakert et al., 2015). Esto indica que el estado estable del lactato en este tipo de configuraciones, está determinado no tanto por la intensidad, sino por la duración del intervalo de trabajo. La creciente disponibilidad de dispositivos para la medición de la concentración de lactato sanguíneo en campo, lo posiciona como una herramienta útil para la monitorización en sesiones de HIIT, aunque pueda presentar dificultades cuando se necesite supervisar las respuestas en un plantel deportivo con gran número de jugadores.

1.2.2.3. *Frecuencia Cardíaca*

Desde hace décadas se ha estado investigando los alcances de la monitorización de la FC para el control de la carga, desarrollándose fórmulas de regresión entre los porcentajes de potencia pico o VO_{2max} y porcentajes de la FC máxima (FC_{MAX}), que permiten estimar de manera fiable la intensidad de un ejercicio, (Arts & Kuipers, 1994; Londeree, Thomas, Ziogas, Smith, & Zhang, 1995). Estos métodos se basan en la relación lineal entre la FC y el nivel de consumo de oxígeno, durante ejercicios con modalidades de trabajo en estado estable (Borresen & Lambert, 2009; Halson, 2014). La evidencia indica también una baja variabilidad de la FC de trabajo (FC_W) ($ICC = 0.99$, $\%CV = 2.3$) y de la FC de recuperación (FC_{REC}) ($ICC = 0.97$, $\%CV = 8.1$) en mediciones repetidas inter día (Lamberts, Lemmink, Durandt, & Lambert, 2004). Sin embargo, es necesario considerar que estos estudios han sido originalmente planteados para esfuerzos sub-máximos, continuos y progresivos, y que se ha reportado una posible disociación entre la FC y el VO_2 , durante el ejercicio intenso (Lepretre, Koralsztejn, & Billat, 2004; McCole, Davis, & Fueger, 2001). Este punto permite explicar que, en configuraciones de HIIT, a intensidades máximas o supra-máximas respecto de la carga asociada al VO_{2max} , se observen porcentajes sub-máximos de entre el 90 y 96 % de la FC_{MAX} (Dupont et al., 2002; Rozenek et

al., 2007; Tschakert et al., 2015). Por lo tanto, es precisa la inclusión de parámetros complementarios derivados de la FC, que puedan servir como indicadores del estrés implicado durante una sesión de HIIT. En este sentido, la FC pico (FC_{PICO} , valor medio más elevado durante un período de 10 segundos) ha mostrado ser sensible a la variación de los componentes de duración y densidad, resultando en valores más elevados durante protocolos con intervalos largos (Seiler & Sjørnsen, 2004; Tschakert et al., 2015) o densidades elevadas (Rozenek et al. 2007); pero no así para el componente de intensidad, donde las diferencias reportadas no han sido significativas (Dupont et al., 2002; Wakefield & Glaister, 2009). La FC media (FC_{MEDIA}) incluye los valores registrados durante los esfuerzos y las pausas, brindando una información general del impacto de la sesión. Además ha mostrado ser sensible a la variación del componente densidad (Rozenek et al. 2007). Sin embargo, es importante puntualizar que puede ser observada una FC_{MEDIA} similar, entre dos configuraciones de HIIT que impliquen un distinto estrés metabólico (p.e. intervalos cortos vs largos) (Tschakert et al., 2015). Esto puede ser explicado por las diferencias de oscilación o amplitud de FC_W y FC_{REC} entre protocolos (Tschakert & Hofmann, 2013). En esfuerzos cortos FC_{PICO} , FC_W y FC_{REC} , presentan valores cercanos FC_{MEDIA} , hecho que contrasta con configuraciones con esfuerzos largos donde se observa una marcada diferencia entre los mismos indicadores (Seiler & Sjørnsen, 2004). Más allá de las limitaciones señaladas, la monitorización de la FC no presenta las dificultades de los anteriores parámetros, en cuanto a la disponibilidad y aplicabilidad de los dispositivos, como tampoco es un limitante la cantidad de atletas que deban ser supervisados.

1.2.2.4. Ratio de Percepción de Esfuerzo

El RPE se basa en capacidad subjetiva de un atleta para interpretar el estrés fisiológico que experimenta durante el ejercicio, y ajustar, en consecuencia, la intensidad de ejecución del mismo (Borresen & Lambert, 2009). Los fundamentos neurofisiológicos que validan el uso del RPE, se sustentan en que los incrementos en la actividad muscular son resultado directo de una mayor actividad de señales nerviosas eferentes. Estas señales son originadas en la corteza motora y, de manera paralela, copias de las mismas son enviadas a la corteza sensitiva, evocando señales de percepción del esfuerzo que son continuamente monitorizadas. A mayor actividad muscular, mayor cantidad de señales llegarán a la corteza sensitiva, intensificando, de este modo, la sensación de esfuerzo (Lagally et al., 2002). Diversas escalas han sido propuestas para cuantificar el esfuerzo percibido. El estudio de Borg (1970) ha sido uno de los pioneros, extendiendo hasta nuestros días el uso de la escala de catorce puntos (6 a 20), como indicador complementario del estrés fisiológico para esfuerzos de resistencia incrementales. El autor y su grupo han seguido construyendo escalas alternativas, tendientes a incrementar la precisión de las puntuaciones, como son la de ratios de categorías (CR-10) o la escala centiMax (Borg & Borg, 2002; Borg & Kaijser, 2006). De la misma manera, se han diseñado escalas que permiten valorar la activación muscular expresada como porcentaje de la fuerza máxima (Lagally & Robertson, 2006). El uso del RPE ha sido validado, también, para cuantificar la carga total de entrenamiento (session RPE) en sesiones de fuerza (Day, McGuigan, Brice, & Foster, 2004; Sweet, Foster, McGuigan, & Brice, 2004) o fútbol (Impellizzeri, Rampinini, Coutts, Sassi, & Marcora, 2004). A pesar de no haber publicaciones que hayan validado una escala en particular para sesiones de HIIT, el RPE se ha aplicado en sesiones con esta modalidad de esfuerzo. Para ello se han utilizado las escalas existentes respetando los criterios de administración de las mismas, como son la visualización de la escala de manera permanente o la selección del momento de puntuación, según se trate de determinar el esfuerzo puntual o la

valoración de la sesión. Al respecto, se han observado diferencias significativas en el RPE entre protocolos HIIT que manipulaban la duración del intervalo de trabajo (mayor RPE a mayor duración) (Price & Moss, 2007), la densidad del esfuerzo (mayor RPE a mayor densidad) (Rozenek et al. 2007) y el volumen (mayor RPE conforme aumenta el volumen) (Price & Moss, 2007; Okuno et al., 2011). Este patrón de respuesta observado en el componente de volumen, contrasta con el reportado por Green et al. (2009) para sesiones continuas a carga constante; donde observaron que el RPE no se veía afectada por el volumen total completado entre sesiones de 20, 30 y 40 minutos. Entendiendo que aún debe profundizarse la investigación sobre los alcances del RPE para prescripciones precisas de HIIT, no deja de ser una herramienta fiable, práctica y económica, la cual puede ser combinada con otros parámetros para proveer información adicional sobre la carga interna experimentada por un atleta (Halsen, 2014).

Si bien los cuatro parámetros mencionados permiten monitorizar con suficiente precisión la respuesta cardiorrespiratoria, metabólica y perceptiva, durante la ejecución de distintos regímenes de HIIT, no son válidos para detectar el nivel de fatiga neuromuscular. En consecuencia, es importante considerar los posibles efectos que puede desencadenar la aplicación una carga de HIIT en variables asociadas al status neuromuscular, a fin de obtener una valoración completa de los factores que puede actuar como limitantes del rendimiento.

1.3. Valoración de la Fatiga Neuromuscular mediante Pruebas de Salto

Las pruebas de salto han demostrado ser una herramienta eficaz para valorar la fuerza explosiva (Hori et al., 2009; Markwick, Bird, Tufano, Seitz, & Haff, 2015; Moir, 2008), examinar el estatus neuromuscular (Izquierdo, Aguado, González, López, & Häkkinen, 1999), detectar efectos de fatiga, recuperación y entrenamiento (Benjaminse et al., 2008; Birdsey et al., 2019; Claudino et al., 2017; Cormie, McGuigan, & Newton, 2010; Marshall & Moran, 2013; Ramirez-López et al., 2020), determinar asimetrías en miembros inferiores (Bishop et al., 2020; Impellizzeri, Rampinini, Maffiuletti, y Marcora, 2007) o medir la rigidez tendinosa (Abdelsattar, Konrad, & Tilp, 2018; Brauner, Sterzing, Wulf, & Horstmann, 2014).

En la literatura han sido validadas diversas pruebas de saltos verticales, las cuales se diferencian en base a factores como las características de inicio y ejecución, el impulso de los miembros superiores, la incorporación de carga añadida, y la valoración de saltos simples o repetidos (Cormack, Newton, McGuigan, & Doyle, 2008; Kipp, Kiely, Giordanelli, Maloy, & Geiser, 2018; Kirby, McBride, Haines, & Dayne, 2011; Taylor, Cronin, Gill, Chapman, & Sheppard, 2010). Por lo tanto, la implementación de una prueba determinada, debe considerar los aspectos mecánicos sobre los que se pretenda obtener información (Hara, Shibayama, Takeshita, Hay, & Fukushima, 2008).

1.3.1. Salto contramovimiento (CMJ)

El CMJ es una prueba de salto vertical, ampliamente extendida en el ámbito de las ciencias de la actividad física y del deporte, que provee información relacionada con el ciclo de estiramiento-acortamiento muscular (Gathercole, Sporer, Stellingwerff, y Sleivert, 2015; Pagaduan y De Blas, 2013). Aunque los criterios de ejecución pueden variar de acuerdo a los estudios, existe suficiente consenso en la necesidad de supervisar los siguientes puntos: i) que las manos se mantengan firmes a la cintura en todo momento, ii) que el salto se inicie en posición de pie, luego una estancia estática de al menos 5 segundos, iii) que el salto se ejecute lo más rápido posible, intentando alcanzar la máxima altura, iv) que se realice un movimiento

continuo durante todo el recorrido (sin pausas entre el desplazamiento descendente y ascendente), v) permitir una profundidad de desplazamiento libre, y vi) que se mantenga una posición extendida en la cadera, rodillas y tobillos durante la fase de vuelo y hasta el contacto del aterrizaje (Hori et al., 2009; Kibele, 1998; Pagaduan y De Blas, 2004; Rodacki, Fowler, & Bennett, 2002; Watkins et. al, 2018). Otro aspecto que ha generado cierta controversia, es si el valor que debe considerarse para una medición del CMJ, es el máximo de una serie de intentos o la media de los mismos. Al respecto, la evidencia parece indicar que, para detectar fatiga o efectos de entrenamiento, es más efectivo promediar los valores de una serie de intentos ya que incrementa la sensibilidad de la medida (Claudino et al., 2017).

1.3.2. Fuerza de Reacción Vertical (VGRF)

Distintos dispositivos como alfombras de contacto (Markovic, Dizdar, Jukic, & Cardinale, 2004), cámaras de video de alta velocidad (Benjaminse et al., 2008; Hara et al., 2008), sistemas de cronómetros ópticos (Furlong et al., 2019), transductores lineales de velocidad (Taylor et al., 2010) y plataformas de fuerza (Cormack et al., 2008; Hori et al., 2009; Kibele, 1998), pueden ser usados para medir el rendimiento en el CMJ. Sin embargo, algunas limitaciones pueden emerger en el momento de analizar los resultados. Por ejemplo, las alfombras de contacto posibilitan medir el tiempo de vuelo y estimar la altura del salto con aceptable fiabilidad (Markovic et al., 2004; Pagaduan y De Blas, 2004), pero no brindan información sobre las características de la generación del mismo.

En contraste, si el salto es realizado en una plataforma de fuerzas, el registro de la VGRF posibilitará estimar la altura del salto mediante distintos métodos (Linthorne, 2001; Moir, 2008) y además, examinar el rendimiento durante la fase de contacto previa (Kibele, 1998; Kirby, et al., 2011). Dado que la VGRF es la fuerza aplicada en el eje vertical (perpendicular respecto al suelo) por unidad de tiempo, los distintos valores obtenidos durante la medición permitirán definir la curva de fuerza-tiempo, y calcular los valores instantáneos para las variables de rendimiento derivadas de esta. Es este sentido una frecuencia de muestro de la plataforma superior a los 200 Hz, garantiza diferencias inter-mediciones por debajo del 2%, lo que representa un valor significativamente inferior al de los cambios que son de interés para investigadores y deportistas (Hori et al., 2009).

1.3.3. Cálculo de Variables de Rendimiento

El cálculo de las variables de rendimiento derivadas de la VGRF se sustenta la ley de aceleración de Newton para fuerza gravitatoria en el eje vertical. Por lo tanto, conociendo este valor ($9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) y el peso del atleta, las diferencias observadas en la medición de la VGRF durante el salto que permiten calcular variables de aceleración y, por tanto, de velocidad y desplazamiento, siempre sobre el mismo eje (Chavda et al., 2018; Harry et al., 2018; Kirby, et al., 2011; Moir, 2008). Los cálculos básicos incluyen, en primer lugar, la determinación de la fuerza neta aplicada, a partir de la sustracción del peso del atleta al valor de VGRF en cada punto de tiempo. La fuerza neta, a su vez, permitirá el cálculo del impulso neto, como el producto de la fuerza neta por la duración del muestreo y de la aceleración neta, como el cociente de la fuerza neta dividida por la masa. Subsecuentemente, se puede calcular la velocidad por medio de la integral de la aceleración vertical neta. El mismo procedimiento puede usarse luego, para calcular el desplazamiento del centro de masas como la integral de la velocidad. Finalmente, la potencia puede ser calculada como el producto de la velocidad por la

VGRF de cada punto (Chavda et al., 2018; Harry et al., 2018; Kirby, et al., 2011; Moir, 2008). El cálculo de estas variables para cada uno de los puntos de muestreo, permitirá visualizar las curvas de velocidad-tiempo, desplazamiento tiempo y potencia-tiempo, así como localizar puntos clave o de interés en las mismas (Harry et al., 2018; McMahon, Suchomel, Lake, & Comfort, 2018). Del mismo modo puede establecerse la diferencia entre dos puntos una curva, en relación a la amplitud de tiempo entre estos; en el caso de la curva de fuerza-tiempo, se denomina ratio de desarrollo de fuerza (RDF), y es un indicador de la eficiencia muscular para de generar elevados niveles de fuerza en períodos reducidos de tiempo (Maffiuletti, et al., 2016; McLellan, Lovell, & Gass, 2011; Laffaye, Wagner, & Tombleson, 2014).

1.3.4. Puntos clave

Los valores máximos y mínimos de cada curva pueden ser, en sí mismos, indicadores del rendimiento; pero, algunos constituyen puntos claves que determinan el inicio o finalización de las distintas fases o sub-fases del salto.

1.3.4.1. Puntos en la curva fuerza-tiempo

Siendo la curva de fuerza-tiempo la medición directa obtenida de la plataforma, la localización de puntos clave en la misma, determinará las fases generales del salto. La fuerza inicial (F_{START}) es el valor de fuerza que determina el inicio del salto. Algunos autores sugieren identificar F_{START} , como el valor equivalente a una reducción porcentual (-5%) respecto del peso corporal (Cormack et al., 2008; Harry et al., 2018); mientras que otros estudios proponen determinarla considerando el ruido (valores residuales) registrado durante la fase de pesaje (punto 1.2.5.1) (Moir, 2008; Owen, Watkins, Kilduff, Bevan, & Bennett, 2014). Para determinar el momento del despegue y el aterrizaje, se han planteado criterios similares, que incluyen tanto valores de fuerza fijos (VGRF < 5N para el despegue, y VGRF > 5N para el aterrizaje) (Cormack et al., 2008) como relativos al ruido registrado durante la fase de vuelo (McMahon et al., 2018). En este último método se establece un umbral equivalente a la media de fuerza registrada durante 30 ms de la fase de vuelo, menos cinco veces la desviación estándar de ese mismo período. Cuando la fuerza registrada cae por debajo de ese umbral se considera iniciado el vuelo y cuando ese mismo umbral es superado, se registra el aterrizaje. La fuerza mínima (F_{MIN}) es identificada como el valor mínimo registrado entre el inicio del salto y el punto en que se alcanza nuevamente el peso corporal (F_{BRAKE}). El pico de fuerza (PF) es el valor máximo de fuerza registrado durante el salto (Cormack et al., 2008; Hori et al., 2009; Harry et al., 2018).

1.3.4.2. Puntos en la curva de fuerza-potencia

Dentro estos podemos destacar: i) la potencia mínima (P_{MIN}), como el valor de potencia más bajo (o máximo valor negativo), ii) el punto en que la potencia pasa a ser positiva, coincidente con el inicio del movimiento ascendente, y iii) el pico de potencia (PP), como el valor de potencia máximo desarrollado (Gathercole et al., 2015).

1.3.4.3. Puntos en la curva velocidad-tiempo

Los puntos principales de esta curva incluyen: i) la velocidad mínima (V_{MIN}), definida como el valor más bajo (o pico de velocidad negativa) que se observa durante el salto,

ii) el pico de velocidad (PV), valor positivo más alto, y iii) La velocidad registrada en el PP (V_{PP}) (McMahon, Rej, & Comfort, 2107; Gathercole et al., 2015).

1.3.4.4. Puntos en la curva desplazamiento-tiempo

El principal punto es la profundidad máxima del contra-movimiento (D_{MAX}) que indica la amplitud del salto y marca el punto en que se pasa de un movimiento descendente a uno ascendente (Hori et al., 2009; Harry et al., 2018; Hori et al., 2009; McMahon et al., 2018).

1.3.5. Determinación de las Fases del CMJ

Una vez identificados los puntos clave en las distintas curvas, pueden establecerse las distintas fases que permitirán analizar el rendimiento del CMJ.

1.3.5.1. Fase de pesaje

La determinación del peso y la masa del ejecutante es un factor crucial para el subsecuente análisis del CMJ, ya que es necesario para definir el inicio del salto, calcular las variables derivadas y expresar los valores en términos relativos. Una fase de pesaje previa al inicio de cada salto, y que incluya el registro de la VGRF durante un período mayor a dos segundos, en el que el participante debe mantenerse en posición de pie evitando movimientos en cualquier plano, ha sido recomendada en varios estudios (McMahon et al., 2018; Moir, 2008; Street, McMillan, Board, Rasmussen, y Heneghan, 2001).

1.3.5.2. Fase de contacto

La fase de contacto abarca desde el inicio del salto, definido por F_{START} hasta el momento del despegue. Si bien esta fase ha sido propuesta como unidad de análisis para determinar las características de la contracción (Moir, 2008), la misma puede, a su vez, ser analizada en sub-fases que otorguen mayor información respecto al patrón de ejecución.

1.3.5.3. Fase de vuelo

Se inicia con el despegue y concluye en el aterrizaje. Su duración es el tiempo de vuelo (FT) el cual permite determinar la altura alcanzada mediante distintas ecuaciones (Linthorne, 2001; Moir, 2008).

1.3.6. Análisis del CMJ por subfases

Como hemos mencionado anteriormente, la fase de contacto puede dividirse en subfases a fin de obtener información pormenorizada de sobre los mecanismos neuromusculares implicados en el salto. Distintos enfoques han sido desarrollados para explicar dichos mecanismos, los cuales están asociados a las distintas curvas y puntos clave.

1.3.6.1. Enfoque basado en el desplazamiento

Este enfoque establece dos subfases basadas en el desplazamiento del centro de masas a lo largo de la ejecución del salto (Cormie et al., 2010; Gathercole et al., 2015; Hori et al., 2009). Una

denominada excéntrica que se extiende desde el inicio del salto hasta D_{MAX} , y representa el movimiento descendente del CMJ; y otra concéntrica, desde D_{MAX} hasta el despegue que representa el movimiento ascendente o propulsivo.

1.3.6.2. Enfoque basado en la fuerza

Este enfoque planteado por Cormack et al. (2008) también establece una fase excéntrica y una concéntrica, pero determinadas por F_{MIN} . De este modo, la subfase excéntrica representa la zona en la cual disminuye la VGRF, y la subfase concéntrica, la zona en que la fuerza comienza a incrementar para producir el salto.

1.3.6.3. Enfoque basado en la velocidad

Este tercer enfoque determina tres subfases. La primera denominada subfase de aligeramiento, abarca desde el inicio del salto hasta V_{MIN} . Dado que este punto coincide con el punto en que la VGRF es igual al peso corporal, esta subfase comprende el área que se encuentra por debajo del mismo. La siguiente subfase es la de frenado, y se extiende desde V_{MIN} hasta el punto en que la velocidad es igual a cero (McMahon et al., 2018). Esta subfase también ha sido denominada “excéntrica” por los mismos autores (McMahon et al., 2017). La tercer subfase es la fase propulsiva y coincide con la sub-fase concéntrica basada en el desplazamiento.

1.3.6.4. Enfoque integrado fuerza-desplazamiento-tiempo

Este último enfoque también se compone de tres subfases (Harry et al., 2018). Una subfase de descarga, ($F_{START} - F_{MIN}$), una subfase excéntrica, que abarca desde F_{MIN} hasta D_{MAX} , y representa la porción del salto en la cual se observa un incremento de la VGRF conjuntamente a un desplazamiento descendente del centro de masas. La tercera subfase es la concéntrica o propulsiva descrita en los puntos anteriores (1.4.6.1 y 1.4.6.3).

Estos enfoques brindan información específica de los patrones de movimiento involucrados el resultado final del CMJ. Sin embargo, hay dos cuestiones que ameritan ser resaltadas. Por un lado, ninguno de los enfoques analiza la zona entre el primer punto clave (F_{MIN}) y el segundo (V_{MIN}), la cual podría aportar información importante sobre los aspectos neuromusculares previos al inicio de la desaceleración. Por otro lado, la utilización de los términos “excéntrico” y “concéntrico” puede llevar a confusión, ya que un mismo término puede ser aplicado a dos sub-fases distintas. Por ejemplo, la subfase excéntrica del enfoque basado en desplazamiento, analiza aspectos distintos que la subfase excéntrica basada en la fuerza, y ambas, a su vez, distintas que la subfase excéntrica basada en la velocidad. Por lo tanto, es recomendable referirse a las subfases definiéndolas en base al componente principal que la misma refleja (p.e subfase de frenado). Este aspecto también cobra relevancia al momento de analizar la variabilidad entre dos mediciones, ya que la fiabilidad en de una variable dada (p.e. fuerza media) puede diferir según se la analice en una u otra subfase.

1.3.7. Fiabilidad de las variables de rendimiento en plataforma de fuerzas

El análisis del CMJ por subfases, permite un diagnóstico más preciso de las estrategias empleadas en la generación del salto (Cormie et al., 2010; Harry et al., 2018). Por lo tanto, para determinar si las diferencias observadas entre dos mediciones responden a un efecto de

intervención, o son inherentes a la variabilidad propia de la medida (Weir, 2005), es necesario considerar la fiabilidad de las variables de rendimiento en cada una de las subfases. En varios estudios que han abordado este tema, se ha reportado una alta fiabilidad en las variables de fuerza (PF y media concéntrica), de potencia (PP y media concéntrica), de velocidad (PV), de desplazamiento (D_{MAX}) y en el impulso neto relativo. Cormack et al., 2008; Gathercole et al., 2015; Hori et al., 2009; Kirby, et al., 2011; McMahon et al., 2017; Taylor et al., 2010). Sin embargo, algunas discrepancias pueden observarse en las variables de tiempo, las cuales han mostrado diferentes resultados entre los estudios, indicando baja, moderada y alta fiabilidad, según el caso (Cormack et al., 2008; Gathercole et al., 2015; McMahon et al., 2017). Lo mismo sucede con la fiabilidad de V_{MIN} (Cormack et al., 2008; Gathercole et al., 2015) y del RDF (Gathercole et al., 2015; Hori et al., 2009; McLellan et al., 2011). Asimismo, hay cierta carencia de información respecto al nivel de fiabilidad de variables específicas, para varias de las subfases mencionadas, principalmente en aquellas comprendidas durante el desplazamiento descendente.

1.3.8. El CMJ como parámetro de monitorización del HIIT

La fatiga neuromuscular ha sido estudiada focalizándose en la respuesta observada en los diversos parámetros de rendimiento del CMJ. Por ejemplo, se ha examinado la respuesta aguda en el CMJ luego de un partido de fútbol australiano de élite, hallándose una disminución de un 15% en la altura del salto condición pospartido (Garret et al., 2019). Resultados similares han sido reportados al término de un protocolo de fatiga de extensiones de rodilla (Rodacki et al., 2002) y luego de sesiones de ejercicios de fuerza resistencia de miembros inferiores (Watkins et al., 2018). Una disminución significativa de la altura del salto, aunque menor (-5.2%), también ha sido detectada al finalizar las series de movimientos de balonmano que simulaban un partido (Thorlund et al., 2008). En este sentido, Gathercole et al., (2015) han concluido que el análisis mediante una batería completa de las variables del salto era el abordaje más prudente para detectar la fatiga neuromuscular, al observar una estrategia de movimiento alterada en el CMJ (diferencias significativas en múltiples variables), luego de la ejecución de dos protocolos intermitentes consecutivos hasta el agotamiento, (Gathercole et al., 2015). Estos resultados parecen indicar que el estatus neuromuscular es afectado por esfuerzos realizados hasta el agotamiento o que impliquen una fatiga muscular localizada. Sin embargo, los efectos que puedan tener protocolos regulares de HIIT sobre el rendimiento en el CMJ, no ha sido aún profundizados.

1.4. Clasificación de las Disciplinas deportivas en base a los requerimientos físicos

El conocimiento de los requerimientos físicos de las disciplinas deportivas, es un factor relevante al momento de diseñar un programa de entrenamiento y diagramar las sesiones de trabajo. Al respecto, se han propuesto clasificaciones para agrupar disciplinas con características similares en cuanto a la intensidad de los componentes estático y dinámico (Mitchel, Haskell, Snell, & Van Camp, 2005). Desde esta óptica, ambos componentes están presentes en todas las disciplinas, pero en distintas proporciones. El nivel de sollicitación del componente estático se establece en base al porcentaje de máxima contracción voluntaria activado y el del componente dinámico, en base al porcentaje de VO_{2max} utilizado; considerando que se plantean tres intensidades para cada componente (bajo, moderado y alto), se pueden determinar nueve clases caracterizadas de disciplinas.

La clasificación anterior ha sido revisada desde otra perspectiva, entendiendo que algunas disciplinas incluidas en la misma clase, respecto a la intensidad dinámica y estática, podían presentar diferencias metabólicas entre sí. En este sentido Mascherini, Stefani, & Galanti (2012) plantearon una clasificación basada en los patrones de movimiento, donde distinguieron entre disciplinas “cíclicas”, con un patrón de movimiento repetido y una carga aeróbica prevalente, y “acíclicas” donde existen secuencias distintas de movimiento y una alternancia entre los sistemas aeróbicos y anaeróbicos. Esta clasificación ha sido respaldada por sus resultados, en los cuales observaron diferencias significativas en el VO_{2max} y el umbral láctico, entre deportistas cíclicos (ciclistas) y acíclicos (basquetbol y fútbol), y diferencias no significativas en la comparación entre los dos grupos acíclicos.

También se han analizado los perfiles neuromusculares entre deportes de campo (futbol americano y baseball) y deportes de pabellón (basquetbol y voleibol), encontrándose un rendimiento significativamente mayor en el CMJ en los primeros (Laffaye et al., 2013).

Respecto a la implementación de protocolos de HIIT en relación al tipo de disciplina y la especificidad deportiva, podemos señalar que la misma ha sido sugerida tanto para deportes cíclicos (Billat et al., 2000; Dittrich et al., 2014; Seiler et al., 2013) como acíclicos (Hader et al., 2014), aunque no se han reportado resultados que indiquen diferencias entre los mismos.

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

2.1. Justificación del Estudio

La evidencia científica actual es clara en cuanto a la efectividad del HIIT como método de desarrollo de la resistencia, como también en los fundamentos generales vinculados a su configuración y monitorización. Sin embargo, algunos elementos necesitan continuar siendo investigados desde nuevas perspectivas, que permitan ampliar y clarificar los alcances del HIIT y establecer la carga óptima en relación a los objetivos del programa.

En este sentido, hemos identificado cuatro aspectos que, a nuestro entender, presentan cierta controversia o aún no han sido examinados en profundidad, y son relevantes para poder establecer los efectos que puede desencadenar el HIIT.

- i) el criterio para definir el intervalo de trabajo como corto o largo no ha sido definido claramente, ni se ha analizado suficientemente las diferencias en la respuesta funcional entre protocolos HIIT con esfuerzos de corta, media y larga duración, para una misma carga relativa total de trabajo.
- ii) tampoco parece existir un criterio claro que permita determinar el volumen total de una sesión HIIT, y que pueda aplicarse como parámetro sobre el cual individualizar la carga.
- iii) existe poca información relacionada a la respuesta neuromuscular durante la ejecución de sesiones de HIIT, particularmente entre sesiones regulares de entrenamiento no ejecutadas hasta el agotamiento y sus efectos sobre parámetros específicos asociados a las subfases del CMJ.
- iv) no se han examinado en profundidad las posibles diferencias en las respuestas fisiológicas, perceptivas y neuromusculares, entre deportistas de distintas disciplinas (p.e. cíclicos vs acíclicos) y para distintos formatos de HIIT.

2.2. Objetivos e Hipótesis

Considerando los aspectos mencionados, en la presente investigación se plantean los siguientes objetivos:

Objetivos Generales

- Analizar los efectos de la modulación del componente de duración del esfuerzo, sobre los parámetros fisiológicos, perceptivos y neuromusculares, en sesiones de HIIT con una misma carga relativa total.
- Establecer un criterio válido para determinar el volumen total de trabajo en sesiones de HIIT, ejecutados a una intensidad equivalente a la velocidad aeróbica máxima.
- Examinar si el rendimiento en la prueba de CMJ, es un indicador fiable de la fatiga neuromuscular, durante la ejecución de protocolos de trabajo intervalados.
- Identificar las posibles diferencias en las respuestas funcionales al HIIT, en relación al carácter del esfuerzo de las disciplinas deportivas involucradas.

Objetivos Específicos:

- Comparar la respuesta en la FC entre protocolos HIIT con intervalos de trabajo de distinta duración, pero igual carga relativa total.
- Comparar la respuesta en la concentración de lactato sanguíneo entre protocolos HIIT con intervalos de trabajo de distinta duración, pero igual carga relativa total.
- Comparar la respuesta en el RPE entre protocolos HIIT con intervalos de trabajo de distinta duración, pero igual carga relativa total.
- Determinar la fiabilidad de las variables de rendimiento, en las diferentes sub-fases del CMJ.
- Comparar la respuesta en indicadores cinéticos y cinemáticos del rendimiento del CMJ, entre protocolos HIIT con intervalos de trabajo de distinta duración, pero igual carga relativa total.
- Estimar el efecto del volumen total relativo de una sesión HIIT sobre la concentración de lactato sanguíneo.
- Estimar el efecto del volumen total relativo de una sesión HIIT sobre el RPE.
- Estimar el efecto del volumen total relativo de una sesión HIIT sobre indicadores cinéticos y cinemáticos del rendimiento del CMJ.
- Comparar las respuestas observadas en los distintos parámetros de monitorización del HIIT, entre deportistas cíclicos y acíclicos.

El alcance de los objetivos descriptos permitirá contrastar las hipótesis que se defienden en esta tesis doctoral, las cuales se enuncian a continuación:

H₁: Una sesión de HIIT con mayor duración del intervalo de trabajo producirá mayor estrés metabólico y perceptivo que otra sesión de igual magnitud de carga y menor duración del intervalo de trabajo.

H₂: La determinación del volumen mediante indicadores relativos puede utilizarse como un criterio efectivo para programar sesiones de HIIT.

H₃: Los umbrales de fatiga neuromuscular asociados a la ejecución de una sesión de HIIT, pueden ser detectados mediante pruebas de CMJ.

H₄: El estatus neuromuscular estará condicionado por el tipo de fraccionamiento del HIIT y por el volumen relativo acumulado.

H₅: El carácter del esfuerzo asociado a la disciplina deportiva (cíclico o acíclico), influirá en las respuestas agudas observadas durante sesiones de HIIT con distintos fraccionamientos.

2.3. Desarrollo Metodológico

A fin de alcanzar los objetivos planteados y verificar las hipótesis enunciadas, se han llevado a cabo tres estudios complementarios, cuyas publicaciones conforman el compendio de la presente tesis doctoral y se detallan a continuación:

Artículo I: “Effects of work-interval duration and sport specificity on blood lactate concentration, heart rate and perceptual responses during high intensity interval training”

Artículo II: “Reliability of measurements during countermovement jump assessments: analysis of performance across sub-phases”.

Artículo III: “Analysis of the neuromuscular responses during two different High-Intensity Interval Training sessions in athletes of cyclic and acyclic sports”.

En el primer estudio examinaron las respuestas en el lactato sanguíneo, la FC y la percepción de esfuerzo, entre cuatro tipos de protocolos HIT que diferían entre sí únicamente por el componente de duración del intervalo de trabajo; esto permitió caracterizar las configuraciones como fraccionamientos cortos o largos. El segundo estudio permitió, mediante una prueba de ensayos repetidos de cuatro sesiones, establecer las variables y sub-fases del CMJ que presentaban una alta fiabilidad. Finalmente, basándonos en los resultados del estudio 1, para definir la duración del intervalo de trabajo, y del estudio 2, para seleccionar las variables de rendimiento del CMJ, se completó el tercer estudio donde se analizaron la respuesta neuromuscular y los efectos del incremento del volumen y la especialidad deportiva, entre dos protocolos HIIT con diferente tipo de fraccionamiento (corto o largo).

3. COMPENDIO DE PUBLICACIONES

3.1. Artículo I

Effects of work- interval duration and sport specificity on blood lactate concentration, heart rate, and perceptual responses during high intensity interval training

Enlace: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200690>

Objetivos

Los objetivos del presente estudio fueron: a) examinar las respuestas fisiológicas y perceptivas entre sesiones de HIIT con diferente duración del intervalo de trabajo y b) determinar diferencias entre grupos en relación con la disciplina deportiva practicada.

Material y Métodos

Participantes

Diecinueve atletas (doce hombres y siete mujeres) participaron en el estudio. Todos se hallaban compitiendo de manera federada a nivel regional y contaban con una experiencia mínima de cinco años en la práctica deportiva. De acuerdo a las características de las disciplinas, los participantes fueron clasificados en el grupo de Disciplinas Cíclicas (atletas de media y larga distancia, $n = 9$) o Disciplinas Acíclicas (deportes de equipo, $n = 10$).

Procedimientos

Todos los participantes completaron un total de seis sesiones, en sus lugares habituales de entrenamiento y con una separación mínima de 48 horas entre las mismas. En las dos primeras sesiones se realizaron las valoraciones preliminares, para determinar la velocidad aeróbica máxima (sesión 1) y el tiempo máximo hasta la extenuación (T_{LIM}) (sesión 2). En base a estos resultados, para cada sujeto se programaron, cuatro sesiones HIIT de igual magnitud de carga (intensidad = 100%, volumen = T_{LIM} , densidad = 1:1) pero con diferente duración de los intervalos de trabajo ($S = 10$ s, $IS = 50$ s, $IL = 90$ s y $L = 130$ s). La frecuencia cardíaca fue registrada constantemente a lo largo de todas las sesiones con un monitor Polar (RS800CX, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). Antes de iniciar el calentamiento y 3 minutos luego de la finalización del esfuerzo, se tomaron muestras de sangre capilar del lóbulo de la oreja para determinar la concentración de lactato pre y post-esfuerzo usando un analizador portátil (Lactate Pro 2, Arkray, Japan). En las cuatro sesiones experimentales se valoró el ratio de percepción del esfuerzo usando la escala CR-10 e indicando a los atletas que puntúen en la misma la percepción de esfuerzo de la sesión, inmediatamente al final de completar la última repetición.

Resultados

Lactato sanguíneo

En la condición post-esfuerzo, la concentración de lactato sanguíneo fue significativamente mayor en T_{LIM} respecto a todos los protocolos fraccionados ($p < .001$). También se han observado diferencias significativas entre protocolos, con valores más bajos en el protocolo S respecto a los protocolos IL y L ($p < .001$) y en el protocolo IS respecto a los protocolos IL y L ($p = .001$ y $p < .001$, respectivamente). No se ha observado diferencias entre grupos (Cíclicos versus Acíclicos) ni interacción entre factores (protocolo x disciplina).

Frecuencia Cardíaca

La FC pico ha mostrado valores significativamente menores en los protocolos cortos respecto a los largos (S versus IL ($p = .004$) y L ($p < .001$), e IS versus IL y L ($p < .001$)). Un efecto de la duración del intervalo de trabajo también ha sido observado en la FC media, donde el valor del protocolo S mostró valores significativamente mayores que el resto de protocolos ($p = .001$).

Ratio de Percepción de Esfuerzo

Los valores de percepción del esfuerzo arrojaron diferencias significativas entre los protocolos. Una mayor percepción de esfuerzo se ha observado en L respecto a S e IS ($p < .001$), como también en IL respecto a S e IS ($p < .001$).

Correlaciones

Se han observado correlaciones significativas entre la concentración de lactato sanguíneo y la RPE ($r = 0.60$; $p < .001$), así como entre la concentración de lactato sanguíneo y la FC pico ($r = 0.62$; $p < .001$).

Conclusiones

Los datos obtenidos en este estudio sugieren que si todos los otros componentes de la carga de HIIT se mantienen constantes, la duración del intervalo de trabajo puede producir un estrés diferente aun cuando sean aplicados protocolos individualizados. Los formatos intermitentes (intervalos de trabajo menores a 60 s) permiten completar una sesión dada con concentraciones más bajas de lactato sanguíneo y una menor percepción de esfuerzo, mientras que los formatos de intervalos largos provocan una mayor participación de las vías glucolíticas. No se han observado respuestas diferentes asociadas al tipo de disciplina en ninguno de los protocolos. Por lo tanto, en vista de la importancia de alcanzar adaptaciones específicas, la duración del intervalo de trabajo puede ser usada como una herramienta que permita orientar las sesiones HIIT, tanto para atletas de resistencia como para deportes de equipo.

3.2. Artículo II

Reliability of measurements during countermovement jump assessments: Analysis of performance across sub-phases

Enlace: <https://doi.org/10.1080/23311886.2020.1843835>

Objetivos

El propósito general del presente estudio ha sido valorar la fiabilidad de las medidas de tiempo, fuerza, potencia, velocidad y desplazamiento derivadas de la fuerza de reacción vertical, en las diferentes fases y sub-fases usadas para analizar el rendimiento del salto contra-movimiento (CMJ).

Material y Métodos

Participantes

Diecisiete atletas hombres, con una experiencia mínima de tres años compitiendo a nivel regional y sin lesiones reportadas en los últimos seis meses.

Procedimientos

Cada participante fue evaluado en cuatro ocasiones. El mismo protocolo fue implementado en todas las sesiones el cual implicaba realizar las pruebas en la misma franja horaria, ejecutar el mismo calentamiento previo estandarizado y respetar los mismos criterios de ejecución del CMJ. Todas las pruebas fueron completadas sobre una plataforma de fuerzas (Kistler 9253B11, Kistler Instrument AG, Winterthur, Switzerland) conectada a un programa informático (Bioware 5.3) La fuerza de reacción vertical del suelo (VGRF) obtenida a una frecuencia de muestreo de 1000 Hz fue utilizada para calcular las variables de rendimiento derivadas y determinar los puntos clave y las sub-fases del salto.

Resultados

Un total de 204 ensayos válidos fueron registrados. En cada ensayo se calcularon 92 variables de rendimiento asociadas a las distintas fases y sub-fases del CMJ y se determinó su nivel de fiabilidad. Los puntos clave para la determinación de las fases y sub-fases mostraron excelente fiabilidad ($ICC > .900$). La fuerza media fue la única medida que presentó valores de fiabilidad altos en todas las sub-fases ($ICC = .931$ a $.963$). Las variables de potencia y velocidad fueron fiables desde el punto en que la fuerza comienza a incrementar, mientras que el desplazamiento desde que la velocidad mínima es alcanzada. El impulso neto y los ratios de desarrollo de fuerza mostraron valores altos y aceptables, respectivamente. Las variables relacionadas al tiempo, fueron las medidas menos fiables ($ICC = .587$ a $.720$), mostrando aceptable fiabilidad solo en la fase de contacto y la sub-fase propulsiva.

Conclusiones

Las valoraciones del CMJ ejecutadas sobre plataforma de fuerzas son un método práctico y fiable que proporciona información específica sobre las estrategias de salto adoptadas. La VGRF puede ser usada para determinar parámetros específicos durante la ejecución del CMJ. Sin embargo, las variables apropiadas deben ser seleccionadas basándose en niveles aceptables de fiabilidad y un procedimiento riguroso debe ser implementado para minimizar la variabilidad entre mediciones.

3.3. Artículo III

Analysis of the neuromuscular responses during two different High-Intensity Interval Training sessions in athletes of cyclic and acyclic sports

Enlace:

https://drive.google.com/file/d/1cL_838nAlCa8F0FBD6KosxkuTiudq_k2/view?usp=sharing

Objetivos

El objetivo del presente estudio ha sido determinar si la aplicación de protocolos regulares de HIIT puede inducir cambios específicos en el estatus neuromuscular, valorado mediante pruebas de salto contra-movimiento (CMJ).

Material y Métodos

Participantes

Veintidós atletas hombre de nivel regional participaron en el estudio. Todos contaban con una experiencia mínima de tres años de práctica competitiva. De acuerdo a las características de la disciplina, los participantes fueron clasificados en dos grupos (cíclicos, n = 11; acíclicos, n = 11). Esta clasificación se aplicó solo para el análisis de los datos, de forma tal que todos los participantes completaron el mismo protocolo de intervención.

Procedimientos

Cada participante completó un total de cuatro sesiones con una separación mínima de 72 horas. Todas las pruebas se llevaron a cabo en una cinta motorizada (H/P Cosmos Quasar, Cosmos Sports & Medical, Nussdorf-Traunstein, Germany) graduada con un 1% de inclinación. En la primera sesión se ejecutó una prueba de carrera incremental máxima y se midió el consumo de oxígeno mediante un analizador de gases (Oxycon Mobile, CareFusion, Hoechberg, Germany). La velocidad asociada al consumo de oxígeno máximo fue registrada como la velocidad aeróbica máxima (VAM). En la segunda sesión, una prueba de tiempo límite hasta la extenuación (T_{LIM}) fue implementada a fin de establecer el volumen total individual a VAM. En base a estos resultados, se diseñaron los dos protocolos experimentales de HIIT (sesiones 3 y 4), que consistieron en 3 series de múltiples repeticiones de carrera a la velocidad aeróbica máxima y con un ratio de trabajo-descanso de 1:1. El volumen total de cada serie era equivalente a T_{LIM} . Una duración del intervalo de trabajo distinta fue aplicada en cada sesión para determinar los protocolos corto y largo. El estatus neuromuscular fue valorado pre-esfuerzo y al final de cada serie, mediante una prueba de salto contra-movimiento sobre plataforma de fuerzas (Kistler 9253B11, Kistler Instrument AG, Winterthur, Switzerland) a una frecuencia de muestreo de 1000 Hz.

Resultados

No se observaron efectos significativos del tipo de protocolo (corto-largo) en ninguna de las variables de rendimiento del CMJ. Un efecto del volumen fue observado sobre el rendimiento en el CMJ. El análisis post-hoc reveló una disminución significativa ($p < .001$) en la altura del salto, en la velocidad del pico de potencia y en el impulso neto, al final de la serie 3. Asimismo, un efecto del tipo de disciplina fue observado en diversos parámetros de rendimiento del CMJ, con valores de fuerza, potencia y velocidad significativamente más elevados en el grupo acíclico comparado con el cíclico, evidenciados principalmente, en la sub-fase de frenado.

Conclusiones

Este estudio demuestra que, durante sesiones de HIIT, el estatus neuromuscular es afectado principalmente por el volumen total ejecutado más que por el tipo de protocolo implementado. Específicamente, una disminución del rendimiento del CMJ ocurre recién cuando un alto volumen de HIIT ha sido completado (p.e. tres veces T_{LIM}). Además, el tipo de disciplina deportiva determina las estrategias de salto que son aplicadas, condicionando también, los aspectos neuromusculares afectados por la fatiga.

4. CONSIDERACIONES FINALES

4.1. Verificación de Hipótesis

El análisis y la integración de los resultados de los tres estudios nos permiten contrastar las hipótesis planteadas y establecer los alcances y contribuciones de los mismos.

La primera hipótesis sostenía que, ante cargas de igual magnitud, una sesión de HIIT con repeticiones de larga duración generaría un mayor estrés metabólico y perceptivo que una sesión con repeticiones cortas. Los resultados del estudio 1 muestran, por un lado, una mayor concentración de lactato sanguíneo y una percepción subjetiva del esfuerzo más elevada en esfuerzos de carácter continuo (test de tiempo límite) respecto a esfuerzos de carácter fraccionado (protocolos HIIT). Por otro lado, indican claramente que los niveles de lactato sanguíneo en sesiones de HIIT con intervalos largos, son significativamente más elevados que las sesiones de HIIT con intervalos cortos, ocurriendo lo mismo con la percepción del esfuerzo. De este modo, podemos aceptar la presente hipótesis y considerar que los protocolos HIIT con fraccionamiento corto de carácter intermitente se sitúan en el rango de 10 a 50 segundos, y los protocolos HIIT con fraccionamiento largo de carácter intervalado, en el rango de 90 a 130 segundos.

La segunda hipótesis enunciaba que el volumen de una sesión HIIT, podría ser determinado por medio de indicadores relativos. Esta hipótesis podemos aceptarla considerando que, tanto en el estudio 1 como en el 3, las repuestas observadas entre sujetos que realizaron cargas absolutas substancialmente diferentes, se veían normalizadas por el hecho de constituir la misma carga relativa.

La siguiente hipótesis planteaba que los umbrales de fatiga neuromuscular asociados a la ejecución de una sesión de HIIT, podrían ser detectados mediante pruebas de CMJ. La misma podemos aceptarla en base a los resultados observados en los estudios 2 y 3. En el estudio 2 hemos determinado la fiabilidad de las variables de rendimiento asociadas a las distintas subfases del CMJ, encontrando valores elevados ($ICC \geq .900$) en gran parte de las mismas. Estas variables fueron luego utilizadas en el estudio 3 para corroborar los efectos de sesiones de HIIT sobre el rendimiento neuromuscular, En tal sentido hemos encontrado una disminución significativa de la altura del salto, la fuerza media de la subfase de propulsión, la velocidad en el pico de potencia y el impulso neto, durante la condición post-esfuerzo respecto a la pre-esfuerzo.

La cuarta hipótesis planteaba que el estatus neuromuscular estará condicionado por el tipo de fraccionamiento HIIT aplicado y por el volumen relativo acumulado. Los resultados obtenidos en el estudio 3 señalan que el incremento en el volumen relativo acumulado, provoca una disminución significativa en distintas variables de rendimiento del CMJ. Sin embargo, el hecho de que no se haya constatado un efecto del tipo de protocolo (corto / largo) sobre ninguna de las variables de rendimiento neuromuscular del CMJ, indica que la modalidad de fraccionamiento no es condicionante del mismo. Por lo tanto, la presente hipótesis debe ser aceptada de manera parcial, ya que el estatus neuromuscular es afectado únicamente por el volumen relativo acumulado.

La última hipótesis de la presente tesis, enunciaba que el carácter del esfuerzo asociado a la disciplina deportiva influiría en las respuestas agudas observadas durante sesiones de HIIT con distintos fraccionamientos. La misma había surgido durante el diseño experimental y se basaba en la perspectiva de que las características y requerimientos propios de la disciplina deportiva, conjuntamente a las modalidades de entrenamiento a las que se encuentran habituados los atletas, afectarían diferenciadamente las respuestas observadas durante el HIIT. Al respecto, preveíamos que los deportistas de disciplinas acíclicas responderían de manera más eficiente a los fraccionamientos cortos, y los atletas de disciplinas cíclicas presentarían una mejor tolerancia en los fraccionamientos largos. Por ello, en los análisis estadísticos realizados en los estudios 1 y 3 se incluyó como factor inter-sujetos la disciplina deportiva. Si bien se encontraron diferencias significativas entre grupos, para las variables de rendimiento asociadas al estado de forma respectivo (mayor VO_2 max y VAM más elevada en cíclicos; mayor rendimiento en el CMJ en acíclicos), no se constató ningún efecto de interacción (tipo de fraccionamiento x disciplina) para las variables asociadas a la respuesta metabólica, perceptiva y neuromuscular durante el HIIT. En consecuencia, debemos rechazar la presente hipótesis entendiendo que la respuesta aguda observada en sesiones de HIIT con distinto fraccionamiento no está influida por el perfil funcional de la disciplina.

4.2. Alcances, Limitaciones y Propuestas para Futuros Estudios

En su conjunto, la presente tesis provee información novedosa vinculada a respuesta metabólica perceptiva y neuromuscular esperable durante la ejecución de sesiones HIIT con distintas configuraciones. Principalmente, brinda datos específicos sobre los efectos agudos asociados a la duración del intervalo de trabajo y el volumen total acumulado, en deportistas jóvenes de nivel regional, proveyendo herramientas metodológicas que favorezcan un diseño óptimo de la carga de HIIT. No obstante, entendemos que existen varias limitaciones en cuanto al alcance de los resultados obtenidos.

La primera limitación que debemos mencionar es el carácter descriptivo del diseño de investigación. Los resultados reportados informan acerca de las respuestas agudas observadas en diferentes sesiones HIIT, pero no pueden extenderse a las posibles adaptaciones que implicaría la implementación de un programa de entrenamiento basado en las configuraciones estudiadas. Futuros estudios deberían considerar el estudio los efectos a corto y medio plazo, de intervenciones que incluyan distintos tipos de fraccionamientos y volúmenes relativos.

Otra limitación que podemos señalar es que en los estudios han participado, mayoritariamente, atletas hombres de nivel regional, debiéndose acotar el alcance de los resultados a dicha población. Futuras investigaciones deberían analizar los efectos del HIIT en otras poblaciones deportivas (p.e. deportistas recreacionales) y en mujeres, a fin de determinar si existen respuestas diferenciadas en los diversos grupos poblacionales.

Uno de los aportes más importantes del presente estudio ha sido la de analizar la respuesta neuromuscular asociada a la fatiga durante protocolos de HIIT. Este aspecto había sido escasamente abordado en estudios previos, por lo que los presentes resultados constituyen datos originales, que pueden brindar una primera aproximación de los mecanismos neuromusculares implicados en el HIIT. No obstante, la valoración mediante plataforma de fuerzas presenta limitaciones a la hora de explicar aspectos específicos de dichos mecanismos, como la activación muscular y la cinemática segmentaria. Por lo tanto, en futuros diseños de investigación deberían incluirse métodos complementarios como la electromiografía o el

análisis de videos con modelos en tres dimensiones, para determinar de manera más precisa los efectos del HIIT en la función neuromuscular.

4.3. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en los estudios que conforman la presente tesis, podemos establecer las siguientes conclusiones:

- La duración del intervalo de trabajo determina las respuestas metabólicas y perceptivas, durante sesiones de HIIT.
- Los HIIT con intervalos de trabajo cortos (< 60 s) generan bajas concentración de lactato sanguíneo ($\approx 3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) y una percepción del esfuerzo categorizada como moderada.
- Los HIIT con intervalos de trabajo de larga duración producen concentraciones de lactato sanguíneo elevadas ($\approx 7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) y una percepción de esfuerzo fuerte, indicando una mayor participación de la vía glucolítica en la generación de energía.
- El rendimiento observado en un test hasta la extenuación, puede utilizarse como criterio válido para determinar el volumen total de una sesión de HIIT.
- La fatiga neuromuscular asociada a la ejecución de una sesión de HIIT, puede ser determinada mediante el análisis por sub-fases de una prueba de CMJ.
- Durante sesiones de HIIT, el estatus no es afectado por el formato de fraccionamiento seleccionado.
- El volumen total relativo de una sesión de HIIT disminuye el rendimiento neuromuscular cuando se ha alcanzado una carga equivalente a tres veces la distancia completada en un test de tiempo límite previo.
- La especificidad deportiva y los requerimientos propios de las disciplinas estudiadas, no condicionan las respuestas metabólicas, perceptivas y neuromusculares, observables durante sesiones de HIIT con diferentes fraccionamientos y volúmenes de trabajo.

5. BIBLIOGRAFÍA

Abdelsattar, M., Konrad, A., & Tilp, M. (2018). Relationship between Achilles tendon and ground contact time during drop jumps. *Journal of Sports Science & Medicine*, *17*, 223-228.

Altenburg, T. M., Degens, H., van Mechelen, W., Sargeant, A. J., & de Haan, A. (2007). Recruitment of single muscle fibers during submaximal cycling exercise. *J Appl Physiol*, *103*, 1752-1756.

Arts, F. J. P., & Kuipers, H. (1994). The relationship between power output, oxygen uptake and heart rate in male athletes. *International Journal of Sports Medicine*, *51*, 228-231.

Benjaminse, A., Habu, A., Sell, T. C., Abt, J. P., Fu, F., H., Myers, J., B., & Lephart, S. M. (2008). Fatigue alters lower extremity kinematics during a single-leg stop-jump task. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, *16*, 400-407.

Billat, V. L., Slawinsky, J., Bocquet, V., Demarle, A., Laffite, L., Chassaing, P., & Koralsztein, J.- P. (2000). Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for longer time than intense but submaximal runs. *Eur J Appl Physiol*, *81*, 188-196.

Birdsey L.P., Weston M., Russell M., Johnston M., Cook C.J., & Kilduff L.P. (2019). Neuromuscular, physiological and perceptual responses to an elite netball tournament. *Journal of sports sciences*, *37*, 2169-2174.

Bishop C., Pereira L.A., Reis V.P., Read P., Turner A.N., & Loturco I. (2020). Comparing the magnitude and direction of asymmetry during squat, countermovement and drop jump tests in elite youth female soccer players. *Journal of sports sciences*, *38*, 1296-1303.

Borg, E., & Borg, G. (2002). A comparison of AME and CR100 for scaling perceived exertion. *Acta Psychol*, *109*, 157-175.

Borg, E., & Kaijser, L. (2006). A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests. *Scan J Med Sci Sports*, *16*, 57-69.

Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehab Med*, *2*, 92-98.

Borresen, J., & Lambert, M. I. (2009). The quantification of training load, the training response and the effect on performance. *Sports Med*, *39*, 779-795.

Brauner, T., Sterzing, T., Wulf, M., & Horstmann, T. (2014). Leg stiffness: Comparison between unilateral and bilateral hopping tasks. *Human Movement Science*, *33*, 263-272.

Buchan, D. S., Ollis, S., Thomas, N. E., Buchanan, N., Cooper, S.- M., Malina, R. M., & Baker, J. S. (2011). Physical activity interventions: effects of duration and intensity. *Scan J Med Sci Sports*, *21*, 341-350.

Buchheit, M., & Laursen, P. (2013a). High-intensity training, solutions to the programming puzzle. Part II: Cardiopulmonary emphasis. *Sports Med*, *43*, 313-338.

- Buchheit, M., & Laursen, P. (2013b). High-intensity training, solutions to the programming puzzle. Part II: anaerobic energy, neuromuscular load and practical applications. *Sports Med*, *43*, 927-954.
- Chavda, S., Broomley, T., Jarvis, P., Williams, S., Bishop, C., Turner, A., N., ..., Mundy, P. (2018). Force-time characteristics of the countermovement jump: analysing the curve in excel. *Strength Cond J*, *40*, 67-77.
- Christmass, M. A., Dawson, B., Goodman, C., & Arthur, P. G. (2001). Brief intense exercise followed by passive recovery modifies the pattern of fuel use in humans during subsequent sustained intermittent exercise. *Acta Physiol Scand*, *172*, 39-52.
- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., Amadio, A. C., & Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *20*, 397-402.
- Cormack, S. J., Newton, R. U., McGuigan, M. R., & Doyle, T. L. (2008). Reliability of measures obtained during single and repeated countermovement jumps. *Int J Sports Physiol Perf*, *3*(2), 131-144.
- Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2010). Changes in the eccentric phase contribute to improved stretch-shorten cycle performance after training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *42*, 1731-1744.
- Dalleck, L., Bushman, T. T., Crain, R. D., Gajda, M. M., Koger, E. M., & Derksen, L.A. (2010). Dose-response relationship between interval training frequency and magnitude of improvement in lactate threshold. *International Journal of Sports Medicine*, *31*, 567-571.
- Day, M. L., McGuigan, M. R., Brice, G., & Foster, C. (2004). Monitoring exercise intensity during resistance training using the session RPE scale. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *18*, 353-358.
- Dittrich, N., de Lucas, R. D., Beneke, R., & Guglielmo, L. G. A. (2014). Time to exhaustion at continuous and intermittent maximal lactate steady state during running exercise. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *9*, 772-776.
- Dupont, G., Blondel, N., Linsel, G., & Berthoin, S. (2002). Critical velocity and time spent at a high level of for short intermittent runs at supramaximal velocities. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *27*, 103-115.
- Dupont, G., & Berthoin, S. (2004). Time spent at a high percentage of VO₂max for short intermittent runs: active versus passive recovery. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *29*, 3-16.
- Egan, B., Carson, B. P., Garcia-Roves, P. M., Chibalin, A. V., Sarsfield, F. M., Barron, N., ..., & O’Gorman, D. J. (2010). Exercise intensity-dependent regulation of peroxisome proliferator-activated receptor γ coactivator-1 α mRNA abundance is associated with differential activation of upstream signalling kinases in human skeletal muscle. *J Physiol*, *588*, 1779–1790.

Foster, C., Farland, C. V., Guidotti, F., Harbin, M., Roberts, B., Schuette, J., ..., Porcari, J. P. (2015). The effects of high intensity interval training vs steady state training on aerobic and anaerobic capacity. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14, 747-755.

Furlong, L.-A. M., Harrison, J., & Jensen, R. (2019). Measures of Strength and Jump Performance Can Predict 30-m Sprint Time in Rugby Union Players. *J Strength Cond Res*. Online ahead of print, doi: 10.1519/JSC.0000000000003170.

Garrett, J., Graham, S. R., Eston, R. G., Burgess, D. J., Garrett, L. J., Jakeman, J., & Norton, K. (2019). A Novel Method of Assessment for Monitoring Neuromuscular Fatigue in Australian Rules Football Players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14, 598-605.

Gathercole R., Sporer B., Stellingwerff T., & Sleivert G. (2015). Alternative Countermovement-jump analysis to quantify acute neuromuscular fatigue. *International journal of sports physiology and performance*, 10, 84-92.

Green, J. M., McIntosh, J. R., Hornsby, J., Timme, L, Gover, L., & Mayes, J. L. (2009). Effect of exercise duration on session RPE at an individualized constant workload. *Eur J Appl Physiol*, 107, 501-507.

Hader, K., Mendez-Villanueva, A., Ahmaidi, S., Williams, B. K., & Buchheit, M. (2014). Changes of direction during high-intensity intermittent runs: neuromuscular and metabolic responses. *BMC Sports Science, Medicine, and Rehabilitation*, 6, 2.

Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med*, 44, 139-147.

Hara, M., Shibayama, A., Takeshita, D., Hay, D. C., & Fukashiro, S. (2008). A comparison of the mechanical effect of arm swing and countermovement on the lower extremities in vertical jumping. *Human Movement Science*, 27, 636-648.

Harry, J. R., Paquette, M. R., Schilling, B. K., Barker, L. A., James, C. R., & Dufek, J. S. (2018). Kinetic and electromyographic subphase characteristics with relation to countermovement vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 34, 291-297.

Hori, N., Newton, R. U., Kawamori, N., McGuigan, M. R., Kraemer, W. J., & Nosaka, K. (2009). Reliability of performance measurements derived from ground reaction force data during countermovement jump and the influence of sampling frequency. *Journal of Strength Conditioning Research*, 23, 874-882.

Impellizzeri, F. M., Rampinini, E., Coutts, A. J., Sassi, A., & Marcora, S. M. (2004). Use of RPE-based training load in soccer. *Med Sci Sports Exerc*, 36, 1042-1047.

Impellizeri F., Rampinini E., Maffiuletti N., & Marcora S. (2007). A vertical jump force test for assessing bilateral strength asymmetry in athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39, 2044-2050.

Izquierdo, M., Aguado, X., González, R., López, J. L., & Häkkinen, K. (1999). Maximal and explosive force production and balance performance in men of different ages. *Eur J Appl Physiol*, 79, 260-267.

Kibele, A. (1998). Possibilities and limitations in the biomechanical analysis of countermovement jumps: A methodological study. *J Appl Biomech*, 14, 105-117.

Kipp, K., Kiely, M. T., Giordinelli, M. D., Malloy, P. J., & Geiser, C. (2018). Biomechanical determinants of the reactive strength index during drop jumps. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13, 44-49.

Kirby, T. J., McBride, J. M., Haines, T. L., & Dayne, A. M. (2011). Relative net vertical impulse determines jumping performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 27, 207-214.

Laffaye G., Wagner P.P., & Tombleson T.I. (2014). Countermovement jump height: Gender and sport-specific differences in the force-time variables. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 28, 1096-1105.

Lagally, K. M., Robertson, R. J., Gallagher, K. I., Goss, F. L., Jakicic, J. M., Lephart, S. M.,...,Goodpaster, B. (2002). *Med Sci Sports Exerc*, 34, 552-559.

Lagally, K. M., & Robertson, R. J. (2006). Construct validity of the OMNI resistance exercise scale. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20, 252-256.

Lamberts, R. P., Lemmink, K. A. P. M., Durandt, J. J., & Lambert, M. I. (2004). Variation in heart rate during submaximal exercise: implications for monitoring training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18, 641-645.

Laursen, P., & Jenkins, D. (2002). The scientific basis for high-intensity interval training. *Sports Med*, 32, 53-73.

Lepretre, P.- M., JEAN-PIERRE Koralsztein, J.- P., & Billat, V. L. (2004). Effect of exercise intensity on relationship between VO_{2max} and cardiac output. *Med Sci Sports Exerc*, 36, 1357-1363.

Linthorne, N. P. (2001). Analysis of standing vertical jumps using a force platform. *Am J Phys*, 69, 1198-1204.

Londeree, B. R., Thomas, T. R., Ziogas, G., Smith, T. D., & Zhang, Q. (1995). $\%VO_{2max}$ versus $\%HR_{max}$ regressions for six modes of exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 22, 458-461.

Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N., & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol*, 116, 1091-1116.

Markovic, G., Dizdar, D., Jukic, I., & Cardinale, M. (2004). Reliability and factorial validity of squat and countermovement jump tests. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18, 551-555.

Markwick, W. J., Bird, S. P., Tufano, J. J., Seitz, L. B., & Haff, G. G. (2015). The intraday reliability of the reactive strength index calculated from a drop jump in professional men's basketball. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 10, 482-488.

Marshall, B. M., & Moran, K. A. (2013). Which drop jump technique is most effective at enhancing countermovement jump ability, "countermovement drop jump" or "bounce" drop jump? *Journal of sports sciences*, 31, 1368-1374.

Mascherini, G., Stefani, L., & Galanti, G. (2012). Anaerobic threshold level in cyclic and acyclic sports. *Open Access Scientific Reports*, 1, 372.

McCole, S. D., Davis, A. M., & Fueger, P. T. (2001). Is there a disassociation of maximal oxygen consumption and maximal cardiac output? *Med Sci Sports Exerc*, 33, 1265-1269.

McLellan, C., Lovell, D., & Gass, G. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *J Strength Cond Res*, 25, 379-385

McMahon, J. J., Rej, S. J., & Comfort, P. (2017). Sex differences in countermovement jump phase characteristics. *Sports*, 5, 8.

McMahon, J. J., Suchomel, T. J., Lake, J. P., & Comfort, P. (2018). Understanding the key phases of the countermovement jump force-time curve. *Strength Cond J*, 40, 96-106.

Menz, V., Marterer, N., Amin, S. B., Faulhaber, M., Hansen, A. B., & Lawley, J. S. (2019). Functional vs. running low-volume high-intensity interval training: effects on VO₂max and muscular endurance. *Journal of Sports Science & Medicine*, 18, 497-504.

Mitchell, J. H., Haskell, W., Snell, P., & Van Camp, S. P. (2005). Task Force 8: classification of sports. *J Am Coll Cardiol*, 45, 1364-1367.

Moir, G. L. (2008). Three different methods of calculating vertical jump height from force platform data in men and women. *Meas Phys Educ Exer Sci*, 12, 207-218.

Okuno, N. M., Perandini, L. A. B., Bishop, D., Simões, H. G., Pereira, G., Berthoin, S., ..., & Nakamura, F. Y. (2011). Physiological and perceived exertion responses at intermittent critical power and intermittent maximal lactate steady state. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 2053-2058.

Owen, N. J., Watkins, J., Kilduff, L. P., Bevan, H. R., & Bennet, M. A. (2014). Development of a criterion method to determine peak power output in a countermovement jump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28, 1552-1558.

Pagaduan, J. C., & De Blas, X. (2013). Reliability of countermovement jump performance on chronojump boscosystem in male and female athletes. *Sport SPA*, 10, 5-8.

Price, M., & Moss, P. (2007). The effects of work: rest duration on physiological and perceptual responses during intermittent exercise and performance. *Journal of Sports Sciences*, 25, 1613-1621.

Ramírez-López C., Till C., Sawczuk T., Giuliano P., Peeters A., Beasley G., Murray F., Pledger S., Read D., & Jones B. (2020). A multi-nation examination of the fatigue and recovery time course during the inaugural Under-18 Six Nation rugby union competition. *Journal of sports sciences*, 38, 644-651.

Richard, R., Lonsdorfer-Wolf, E., Dufour, S., Doutrelau, S., Oswald-Mammosser, M., Billat, V. L., & Lonsdorfer, J. (2004). Cardiac output and oxygen release during very high-intensity exercise performed until exhaustion. *Eur J Appl Physiol*, 93, 9-18.

Rodacki, A. L. F., Fowler, N. E., & Bennett, S. J. (2002). Vertical jump coordination: fatigue effects. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34, 105-116.

- Rosenblat, M. A., Perrotta, A. S., & Thomas, S. G. (2020). Effect of high-intensity interval training versus sprint interval training on time-trial performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, *50*, 1145-1161.
- Rozenek, R., Funato, K., Kubo, J., Hoshikawa, M., & Matsuo, A. (2007). Physiological responses to interval training sessions at velocities associated with VO₂ max. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *21*, 188-192.
- Seiler, S., & Sjørnsen, J. E. (2004). Effect of work duration on physiological and rating of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scand J Med Sci Sports*, *14*, 318-325.
- Seiler, S., Jørganson, K., Olesen, B. V., & Hetlelid, K. J. (2013). Adaptations to aerobic interval training: interactive effects of exercise intensity and total work duration. *Scand J med Sci Sports*, *23*, 74-83.
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables, than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, *5*, 33.
- Street, G., McMillan, S., Board, W., Rasmussen, M., & Heneghan, J. M. (2001). Sources of error in determining countermovement jump height with the impulse method. *J Appl Biomech*, *17*, 43-54.
- Sweet, T. W., Foster, C., McGuigan, M. R., & Brice, G. (2004). Quantitation of resistance training using the session rating of perceived exertion method. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *18*, 796-802.
- Taylor, K.-L., Cronin, J., Gill, N. D., Chapman, D. W., & Sheppard, J. (2010). Sources of variability in iso-inertial jump assessments. *Int J Sport Physiol Perform*, *5*, 546-558.
- Thevenet, D., Leclair, E., Tardieu-Berger, M., Berthoin, S., Regueme, S., & Prioux, J. (2008). Influence of recovery intensity on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young, endurance-trained athletes. *Journal of Sports Sciences*, *26*, 1313-1321.
- Thorlund, J., Michalsik, L., Madsen, K., & Aagaard, P. (2008). Acute fatigue-induced changes in muscle mechanical properties and neuromuscular activity in elite handball players following a handball match. *Scand J Med Sci Sports*, *18*, 462-472.
- Thum, J. S., Parsons, G., Whittle, T., & Astorino, T. A. (2017). High-intensity interval training elicits higher enjoyment than moderate intensity continuous exercise. *PLoS One*, *12*, e0166299.
- Tschakert, G., & Hofmann, P. (2013). High-intensity intermittent exercise: methodological and physiological aspects. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *8*, 600-610.
- Tschakert, G., Kroepfl, J., Mueller, A., Moser, O., Groeschl, W., & Hofmann, P. (2015). How to regulate the acute physiological response to "aerobic" high-intensity interval exercise. *Journal of Sports Science & Medicine*, *14*, 29-36.
- Wakefield, B. R., & Glaister, M. (2009). Influence of Work-interval intensity and duration on time spent at a high percentage VO₂max during intermittent supramaximal exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *23*, 2548-2554.

EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO INTREVALADO DE ALTA INTESIDAD SOBRE PARÁMETROS FISIOLÓGICOS, NEUROMUSCULARES Y PERCEPTIVOS DEL RENDIMIENTO

Watkins, C. M., Barillas, S. R., Wong, M. A., Archer, D. C., Dobbs, I. J., Lockie, R. G., Coburn, J. W., Tran, T. T., & Brown, L. E. (2017). Determination of vertical jump as a measure of neuromuscular readiness and fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*, 3305-3310.

Weir, J. P. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *19*, 231-240.

Zafeiridis, A., Kounoupis, A., Dipla, K., Kyparos, A., Nikolaidis, M., Smilios, I., & Vrabas, I. (2015). Oxygen delivery and muscle deoxygenation during continuous, long-and short-interval exercise. *International Journal of Sports Medicine*, *94*, 872-880.