

Tesis Doctoral

**EFFECTOS DEL EJERCICIO FÍSICO SOBRE EL
RENDIMIENTO EN VIGILANCIA**

(Effects of physical exercise on vigilance performance)

Autor

Francisco Tomás González Fernández

Director

Daniel Sanabria Lucena

Programa de Doctorado en Biomedicina



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Granada, 2017

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales

Autor: Francisco Tomás González Fernández

ISBN: 978-84-9163-389-1

URI: <http://hdl.handle.net/10481/47870>

El doctorando/ *The doctoral candidate* **Francisco Tomás González Fernández** y el directo de la tesis/ *and the thesis supervisor*: **Daniel Sanabria Lucena**.

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección del director de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.


/

We guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral candidate under the direction of the thesis supervisor and, as far as our knowledge reaches, the rights of other authors to be cited (when their results or publications that have been used) have been respected in this work.

Lugar y Fecha / *Place and date*:

En Granada a 19 de Junio de 2017/ *at Granada on July 19, 2017*

Directo de Tesis / *Thesis supervisor*
candidate



Firma/*Signed*

Doctorando/ *Doctoral*



Firma/*Signed*

Publicación de la tesis doctoral:

González-Fernández, F.T., Etnier, J.L., Zabala, M., & Sanabria, D. (en prensa).
Vigilance performance during acute exercise. *International Journal of Sport Psychology*.

Los estudios presentados en esta tesis doctoral han sido financiados a través de una beca de personal investigador en formación correspondiente a proyectos de investigación de excelencia (Convocatoria 2010) de la Junta de Andalucía (SEJ-6414).

Índice General

Índice de Abreviaturas.....	4
Índice de Tablas.....	5
Índice de Figuras.....	6

Capítulo I. Resumen General9

1.1. Resumen General.....	10
1.2. General Abstract.....	12

Capítulo II. Introducción.....15

2.1. Justificación e interés de la tesis doctoral.....	16
--	----

2.2. Ejercicio físico puntual y la cognición.....	19
---	----

2.2.1. Cambios fisiológicos inducidos por la realización del ejercicio físico puntual.....	19
--	----

2.2.2. Contextualización y evolución histórica: teorías, concepciones y modelos que han estudiado las interacciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición.....	21
---	----

2.2.3. Efectos del ejercicio físico puntual en el funcionamiento cognitivo.....	31
---	----

2.2.4. La vigilancia como función cognitiva clave en la relación entre ejercicio físico puntual y la cognición.....	46
---	----

2.3. Ejercicio físico regular y la cognición.....	50
---	----

2.3.1 Cambios fisiológicos inducidos por la realización del ejercicio físico regular.....	51
---	----

2.3.2. Efectos del ejercicio físico regular en el funcionamiento cognitivo.....	54
---	----

2.3.3. La vigilancia como función cognitiva clave en la relación entre el ejercicio físico regular y la cognición	57
---	----

Capítulo III. Planteamiento de la Investigación. Objetivos de la tesis.....	61
Capítulo IV. Experimentos 1, 2 y 3.....	65
Resumen.....	66
Introducción.....	67
Método y diseño.....	68
Resultados.....	74
Discusión.....	80
Capítulo 5. Experimento 4.....	85
Resumen.....	86
Introducción.....	87
Método y diseño.....	88
Resultados.....	94
Discusión.....	97
Capítulo 6. Experimento 5.....	101
Resumen.....	102
Introducción.....	103
Método y diseño.....	104
Resultados.....	112
Discusión.....	115
Capítulo VII. Discusión General.....	119
7.1. Discusión General.....	120
7.2. Efectos del ejercicio físico puntual en vigilancia: Influencia de la intensidad del ejercicio.....	122
7.3. Efectos del ejercicio físico puntual a intensidad ligera moderada: Influencia en una tarea de vigilancia tipo “oddball”.....	126
7.4. Relación entre ejercicio físico, adaptaciones crónicas y la cognición.....	128

Chapter VIII. General Conclusions	133
8.1. General Conclusions.....	134
 Referencias Bibliográficas	 135

Índice de Abreviaturas

ACSM: Colegio Americano de Medicina del Deporte	PACO₂: Presión Arterial de Dióxido de Carbono
AHA: Asociación Americana del Corazón	PSE: Percepción Subjetiva del Esfuerzo
BV: Búsqueda visual	RPM: Respiraciones por minuto
C: Controlado	SART: Tarea de Atención Sostenida a la Respuesta
CDC: Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades	SE: Error Estándar
CO₂: Dióxido de Carbono	SNC: Sistema Nervioso Central
CRT: Tiempo de reacción-elección	SNS: Sistema Nervioso Simpático
EEG: Electroencefalografía	TE: Tamaño del efecto
ET: Estimación temporal	TR: Tiempo de reacción
FC: Frecuencia Cardíaca	TTRS: Tarea de TR simple
FC_{máx}: Frecuencia Cardíaca Máxima	TVP: Tarea Psicomotora de Vigilancia
FCR: Frecuencia Cardíaca de Reserva	VE: Volumen espirado
FNDF: Factor neurotrófico derivado del cerebro.	V0₂máx: Volumen de Oxígeno Máximo
HIIT: Entrenamientos Interválicos de alta Intensidad	V0₂R: Reserva de consumo de oxígeno
IGF-1: Crecimiento insulínico tipo 1	
IMC: Índice de Masa Corporal	
LPM: Latidos por minuto	
MET: Equivalente metabólico	
OMS: Organización Mundial de la Salud	

Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla adaptada del Manual del ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio físico (2010)	38
Table 2. Percentiles de potencia aeróbica máxima para hombres. Adaptado del manual ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio (2010)	41
Table 3. Percentiles de potencia aeróbica máxima para mujeres. Adaptado del manual ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio (2010).....	41
Table 4. Esquema descriptivo de los estudios que se han realizado acerca de los efectos puntuales sobre las funciones cognitivas durante el ejercicio. Extraído de Lambourne & Tomporoski, 2010.....	45
Table 5. Cambios fisiológicos relevantes inducidos por el ejercicio físico regular	52
Table 6. Características antropométricas y fisiológicas de los Experimento 1-3 (media \pm DE).....	69
Table 7. Parámetros fisiológicos en los Experimentos 1-3 (media \pm DE)	79
Table 8. Características antropométricas y fisiológicas de las participantes (media \pm DT).	89
Table 9. Porcentaje promedio de respuestas correctas de las participantes en función del tiempo-en-tarea para cada una de las condiciones de esfuerzo (media \pm DT).	96
Tabla 10. Características antropométricas y fisiológicas de las participantes (media \pm DE)	105

Índice de Figuras

Figura 1. Representación gráfica de la teoría de Yerkes & Dodson (1908).....	22
Figura 2. Comparación de tareas simples vs tareas complejas. Yerkes & Dodson (1908).....	23
Figura 3. Diagrama descriptivo de la teoría de utilización de señales de Easterbrook. Modificada de Easterbrook (1959).....	24
Figura 4: Esquema del modelo de Kahneman. Adaptado de Kahneman, 1973.....	26
Figura 5. Modelo cognitivo-energético de Sanders (Modificado de Sanders, 1983)...	27
Figura 6: Modelo de control compensatorio de Hockey.....	28
Figura 7. Interacción entre el rendimiento y el arousal de acuerdo con la teoría del impulso.....	29
Figura 8. Modelo de Humphreys & Revelle (1984).....	31
Figura 9. Set experimental. Participante realizando la tarea comportamental mientras pedalea en el cicloergómetro.....	70
Figura 10. Ejemplo de un ensayo de la tarea de vigilancia psicomotora.....	71
Figura 11. Media TR (media \pm SE) en función de la condición de esfuerzo y tiempo-en-tarea en el Experimento 1.....	75
Figura 12. Media de los TRs en función de la condición de esfuerzo y el tiempo en tarea en el Experimento 2.	76
Figura 13. Media TR (media \pm Se) en función de la condición de esfuerzo y el tiempo-en-tarea en el Experimento 3.....	78
Figura 14. Secuencia de ensayos de la tarea de oddball.....	91

Figura 15. Representación esquemática de la sesión experimental (ver descripción completa en el texto).....	92
Figura 16. Tiempos de reacción de las participantes en función del factor fase (media \pm SE) en la TVP.....	95
Figura 17. Media de tiempo de reacción para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo en función del esfuerzo (media \pm SE).....	97
Figura 18. Secuencia de eventos para la SART.....	106
Figura 19. Secuencia de eventos para la TTRS.....	107
Figura 20. Distribución de los aparatos e instrumentos empleados durante la realización de las tareas comportamentales.....	108
Figura 21. Representación esquemática del procedimiento llevado a cabo para completar la totalidad del estudio (ver descripción completa en el texto).....	110

CAPÍTULO I

Resumen General

1.1. Resumen

En las últimas dos décadas han surgido numerosas investigaciones que han mostrado los efectos beneficiosos de la actividad física para la salud (Biddle, Fox & Boutcher, 2003; Lee & Skerritt, 2001). Lejos de creer que la actividad física tan sólo prevenía trastornos físicos [e.g., enfermedades cardiovasculares (Haskell et al., 2007)], la literatura científica argumenta que también previene trastornos mentales [e.g., depresión y reducción del estrés (Dunn et al., 2001) o ansiedad (Paluska & Schwenk, 2000)]. Además, entidades de relevancia mundial tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC), el Colegio Americano de Medicina del Deporte (ACSM) o la Asociación Americana del Corazón (AHA), relacionan positivamente la actividad física con la salud general y consideran a la actividad física como algo esencial e indispensable para preservar la salud.

Tal y como argumentábamos anteriormente, algunos investigadores han estudiado el efecto del ejercicio físico en la prevención de enfermedades crónicas y trastornos mentales, pero otros investigadores han dado un paso más y han buscado la relación existente entre la actividad física y la influencia significativa sobre mecanismos cognitivos de alto nivel (McMorris, Tomporowski & Audiffren, 2009) tales como el control cognitivo, memoria, atención espacial o vigilancia. No obstante, hasta donde llega nuestro conocimiento no existen estudios previos que hayan investigado el rendimiento en atención sostenida o vigilancia durante el ejercicio físico puntual. De hecho, de forma general la presente tesis doctoral tiene una perspectiva bastante ambiciosa y pretende investigar los efectos de un esfuerzo puntual a diferentes intensidades sobre tareas de vigilancia y atención sostenida (Experimentos 1-4). Además, también se pretende valorar los efectos de un programa de entrenamiento regular en vigilancia o atención sostenida y en el control inhibitorio (Experimento 5).

Los Experimentos 1-4 se plantearon como una primera aproximación empírica al estudio de la vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio físico puntual, teniendo en cuenta la intensidad del ejercicio como un moderador crucial. Para ello, diseñamos cuatro experimentos para abordar esta cuestión. En el Experimento 1, los participantes completaron la tarea psicomotora de vigilancia (TVP) durante 20' en dos condiciones: de esfuerzo-bajo (20' a una intensidad baja) y de esfuerzo incremental (20' pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del umbral ventilatorio anaeróbico -UVA-), manteniéndose 5

minutos en cada una de las intensidades. En el Experimento 2, se disoció el efecto de la intensidad del tiempo en tarea. Los participantes realizaron la TVP en cuatro sesiones: 5' al 40% del UVA, 5' al 60% del UVA, 5' al 80% del UVA y 5' al 100% del UVA. En el Experimento 3, evaluamos nuevamente utilizando la TVP aunque en esta ocasión con una versión de 45' en una condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% del UVA y se comparó con una condición de esfuerzo-bajo (control).

El siguiente paso en el desarrollo de la presente tesis doctoral fue profundizar acerca de los resultados obtenidos en los Experimentos 1-3. Los resultados de estos experimentos nos condujeron a preguntarnos sobre qué pasaría si investigáramos el efecto del ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada en una tarea de atención sostenida tipo “oddball”. Cambiando el tipo de tarea, modificábamos el tipo de demandas que requería la TVP, incrementando las demandas perceptuales. Para comprobar esta cuestión, diseñamos el Experimento 4, donde un grupo de mujeres jóvenes universitarias realizó una tarea de discriminación perceptiva tipo “oddball” (con una probabilidad de aparición del objetivo de .1) mientras pedaleaban en un cicloergómetro bajo dos condiciones experimentales diferenciadas en la intensidad del esfuerzo: esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero-moderado. El orden de presentación de las dos condiciones fue contrabalanceada a través de las participantes.

Los resultados del Experimento 4 mostraron que el esfuerzo ligero-moderado mostró una tendencia a mejorar el tiempo de reacción (TR) a lo largo de toda la tarea si bien no se encontraron diferencias significativas en exactitud para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo ni en la exactitud a los estímulos no objetivos. Los resultados de los Experimentos 1-4 sugieren que el esfuerzo ligero-moderado mejora la velocidad de respuesta en tareas con demandas de atención sostenida con independencia de la relevancia del estímulo objetivo. Dadas las demandas de atención sostenida tanto de la PVT como de la oddball, estos resultados nos lleva a pensar que la realización de un esfuerzo ligero-moderado mejora la función ejecutiva, replicando resultados previos, más allá del posible efecto de activación/arousal general sobre funcionamiento sensoriomotor.

Nuestro siguiente paso fue el de profundizar acerca de los efectos provocados por el ejercicio físico realizado de forma regular sobre el funcionamiento cognitivo. Mientras que en los anteriores Experimentos 1-4, hicimos referencia a los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (vigilancia y percepción), en el

Experimento 5 exploramos los efectos de la práctica regular de actividad física sobre la vigilancia y el control inhibitorio. El Experimento 5 tiene como objetivo principal analizar los efectos de un programa de entrenamiento físico de diez semanas de duración (3 sesiones de una hora por semana) en las características antropométricas [Índice de Masa Corporal (IMC)], capacidades fisiológicas (UVA, potencia máxima y potencia relativa) y el rendimiento en vigilancia y el control inhibitorio en una población de 32 mujeres jóvenes sanas. Con la intención de valorar la intervención, realizamos dos mediciones (pre-post). En ellas, se recogieron datos de las características antropométricas y datos de las capacidades fisiológicas. Además, se completaron dos tareas cognitivas para evaluar el rendimiento en vigilancia o atención sostenida y para evaluar el control inhibitorio: 1) tarea de atención sostenida a la respuesta (SART) y 2) tarea de TR simple. Crucialmente, la intervención del Experimento 5 demostró su eficacia a nivel físico ya que mejoraron significativamente las características antropométricas y los parámetros fisiológicos de las participantes. Sin embargo, no se encontraron resultados estadísticamente significativos en las tareas comportamentales. Por tanto, los resultados no fueron coincidentes con la mayor parte de investigaciones encontradas en la literatura sobre ejercicio físico regular a intensidades aeróbicas moderadas y efectos positivos sobre las funciones cognitivas. Los resultados se discuten en el marco de la literatura sobre esta temática, teniendo en cuenta además las limitaciones propias de este estudio exploratorio.

En resumen, la presente tesis doctoral que tiene como objetivo principal estudiar los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (vigilancia y percepción), sugieren que el esfuerzo ligero-moderado aumenta la activación general y mejora la velocidad de respuesta en tareas de atención sostenida con independencia de la relevancia del estímulo objetivo. Además, no replicamos el resultado de investigaciones previas que demostraron el efecto de un entrenamiento físico en el rendimiento cognitivo.

1.2. Abstract

In the last two decades, there have been numerous studies that have shown the beneficial effects of physical activity on health (Biddle, Fox & Boutcher, 2003; Lee & Skerritt, 2001). Far from believing that physical activity only prevented physical disorders [e.g., cardiovascular disease (Haskell et al., 2007)], the scientific literature argues that it also prevents mental disorders [e.g., depression and stress reduction (Dunn

et al., 2001) or anxiety (Paluska & Schwenk, 2000)]. In addition, organizations of global relevance such as World Health Organization (WHO), Centers for disease Control and Prevention (CDC), American College of Sports Medicine (ACSM) or the American Heart Association (AHA), have positively related physical activity to general health and contemplate physical activity as essential and indispensable to preserve health.

Experiments 1-4 were designed as an initial empirical approach to the study of vigilance or sustained attention during acute exercise considering exercise intensity as crucial moderator. In Experiment 1, participants performed the psychomotor vigilance task (PVT) for 20' in two conditions: low-effort intensity (20' at low intensity) and incremental intensity (20' pedaling at 40%, 60%, 80% and 100% of the ventilatory anaerobic threshold, VAT) remaining 5' at each intensity. Experiment 2 dissociated the effect of exercise intensity from the time course of the task by asking participants to perform the PVT for 5' at 40%, 60%, 80% and 100% VAT, in different sessions. In Experiment 3, we evaluated participants' performance in a 45' version of the PVT in a light-moderate effort condition at 75% VAT on vigilance performance that was compared with a low effort control condition.

The next step in the development of this thesis was to explore the results obtained in Experiments 1-3. The results of Experiments 1-3 led us to wonder what would happen if we investigate the effect of acute physical exercise at light-moderate intensity on a sustained attention "oddball" task. By changing the type of task, we modified the type of demands that the PVT required, increasing the perceptual demands of the task. In Experiment 4, a group of young females university students performed an oddball perceptual discrimination task (with a probability of target occurrence of .1) while pedaling on a cycle ergometer under two experimental conditions with two different effort intensities: low-effort and light-moderate effort. The order of presentation of two conditions was counterbalanced across participants. The results showed that light-moderate effort induced a trend to accelerate TRs throughout the task, although no significant differences were found in accuracy for target trials or in the accuracy of the non-target stimuli.

Taken together, the results of Experiments 1-4 suggest that light-moderate effort improve the speed of response in task with sustained attention demands irrespective of the relevance of target stimulus. This leads us to believe that the realization of a light-

moderate effort increases the general activation of the participants by accelerating the responses to unpredictable stimuli by a simple psychomotor facilitation that improves the response nonspecifically. In view of sustained attention demands from PVT and oddball task, these results lead us to believe that light-moderate effort improves the executive function, replicating previous results, beyond the possible general activation/arousal effect on sensoriomotor functioning.

Our next step was to examine chronic physical exercise effects on cognitive functioning. In Experiment 5 we explored the effect of chronic exercise on vigilance and inhibitory control. The main aim of Experiment 5 was to analyze the effect of a ten-week physical training program (3 sessions of one-hour per week) on the anthropometric characteristics [Body Mass index (BMI)], physiological capacities (UVA, Maximum and relative power) and performance in vigilance and inhibitory control in a sample of 32 healthy young women. In order to evaluate the intervention, we performed two measures (pre-post). In both, anthropometric characteristics data and physiological capacities data we collected. In addition, two cognitive tasks were completed to evaluate cognitive performance: a simple RT task and the Sustained attention to response task (SART). Crucially, the intervention of Experiment 5 demonstrated its effectiveness at the physical level as it significantly improved the anthropometric characteristics and the physiological parameters of the participants. However, no statistically significant results were found in behavioral tasks. Therefore, the results did not coincide with most investigation found in the literature on chronic exercise at moderate aerobic intensities and positive effects on cognitive functions. These results are discussed within the framework on the literature on this subject, taking into account also the limitation of this exploratory study.

In sum, the present thesis aimed to investigate the effects of acute exercise on cognitive functioning (vigilance and perception) and suggest that moderate-light effort increment general activation and improve the speed of response in sustained attention tasks independently of target stimulus relevance. In addition, we failed to replicate previous accounts on the effect of exercise training on cognitive performance.

CAPÍTULO II

Introducción

2.1. Justificación e interés de la tesis doctoral

La influencia del ejercicio físico puntual sobre las funciones cognitivas ha suscitado un gran interés dentro de la comunidad científica en los últimos años (ver revisiones de Lambourne & Tomporowski, 2010; McMorris et al., 2009; Tomporowski, 2003). De hecho, es preciso recordar los efectos facilitadores del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo encontrados en diferentes meta-análisis (Etnier et al., 1997; McMorris & Hale, 2012; McMorris & Graydon, 2000; Tomporowski, 2003; Vergurgh & cols. 2013). Sin embargo, a pesar de los efectos encontrados y la relevancia que ha adquirido la presente línea de investigación, la gran variabilidad de resultados encontrados genera controversia acerca del estudio de la cognición (Chang & cols. 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010).

Tradicionalmente, las funciones cognitivas se han estudiado en situaciones de reposo en laboratorio, lejos de la realidad en la que nos encontramos inmersos (por ejemplo, sólo tenemos que fijarnos que en la mayoría de los entornos de trabajo las personas tienen que realizar sus funciones en situaciones de movimiento). En este mismo sentido, es relevante destacar que prácticamente en cualquier contexto deportivo, el deportista interactúa con el entorno moviéndose. Por todo ello, en este contexto, es importante estudiar el procesamiento cognitivo y el comportamiento en movimiento, es decir, mientras que realizamos cualquier ejercicio físico.

Los investigadores han buscado la relación existente entre la actividad física y la influencia significativa sobre mecanismos cognitivos de alto nivel (McMorris, Tomporowski & Audiffren, 2009; Tomporowski, 2003) tales como el control cognitivo (e.g., Del Giorno, Hall, O'Leary, Bixby & Miller, 2010; Pontifex & Hillman, 2007; Hillman, Erickson & Kramer, 2008), memoria (Van Dongen et al., 2016), atención espacial (Pesce et al., 2007; Huertas et al., 2011; Sanabria et al., 2011). Nótese que las bases de nuestro comportamiento y la capacidad de interacción con todo lo que está a nuestro alrededor están fundamentadas en los anteriores mecanismos cognitivos, además de en otros tales como la emoción, motivación, lenguaje y aprendizaje. En consecuencia, si tenemos en cuenta que los mecanismos cognitivos de alto nivel tienen un papel relevante en nuestro comportamiento, consideraremos de gran trascendencia profundizar acerca de las funciones del ejercicio físico en el rendimiento de estos mecanismos cognitivos.

En las dos últimas décadas ha habido un especial interés en este importante tema de investigación. De hecho, se ha avanzado hacia la comprensión existente en la interacción entre el ejercicio físico y rendimiento cognitivo (Grego et al., 2004; Pontifex & Hillman, 2007, 2008; Yagi et al., 1999). Es necesario clarificar que la presente tesis focaliza en la vigilancia o atención sostenida principalmente, aunque de forma complementaria también se estudian mecanismos cognitivos tales como la percepción y el control inhibitorio. No obstante, hasta donde llega nuestro conocimiento, no existen demasiados estudios previos que hayan investigado sobre las relaciones entre el ejercicio físico y el rendimiento en atención sostenida o vigilancia¹ y mucho menos durante la realización concurrente de un ejercicio físico.

Los comportamientos humanos que implican atención sostenida o vigilancia se dan con bastante frecuencia en situaciones de movimiento. Muchos investigadores han tomado esto en consideración y han manifestado un interés creciente en los vínculos existentes entre el cerebro/cognición y el deporte/ejercicio físico (Walsh, 2014). En definitiva, mantener un nivel óptimo de vigilancia o atención sostenida será crucial en el ámbito deportivo, dado que por un lado, realizar actividad física es muy demandante debido a la realización concurrente de esfuerzos físicos de distinta intensidad y a la toma de decisiones durante la competición deportiva (ejercicio físico puntual). Por otro lado, parece que la evidencia científica apunta hacia el importante rol que el ejercicio físico y el nivel de condición cardiovascular parecen ejercer sobre el rendimiento en contextos implicando atención sostenida.

La presente tesis doctoral se centra principalmente en la perspectiva del ejercicio físico puntual. De hecho, de forma general el presente proyecto pretende investigar los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo [vigilancia en los Experimentos 1-4] y adicionalmente, como objetivo secundario pretendemos explorar acerca de los efectos del ejercicio físico regular en las funciones cognitivas [atención sostenida y control inhibitorio (en el Experimento 5)].

Teniendo en cuenta este objetivo secundario, es importante comentar que en la actualidad, nadie duda de los efectos beneficiosos que produce la realización de actividad

¹ En la presente tesis doctoral se tratarán los términos atención sostenida y vigilancia como sinónimos en beneficio de una sencilla comprensión del concepto, aunque somos conscientes de los diferentes usos que se han dado de los términos en diferentes campos de la investigación (ver Oken et al., 2006, para discutir el tema en cuestión).

física² en la salud. De hecho, la OMS establece que 30 minutos de actividad física moderado, durante 5 veces a la semana reduce el riesgo de padecer enfermedades o problemas de salud (p. ej., Centers for Disease Control and Prevention, 2008). Además, los beneficios que el ejercicio físico moderado tiene sobre la salud, a nivel cardiovascular y respiratorio principalmente, están ampliamente demostrados (Pontifex & cols., 2011). Son numerosas las investigaciones existentes en el campo de la medicina, fisiología, psicología o ciencias del deporte que han manifestado interés por este fundamental tema de investigación. Sin embargo, paralelamente a la salud física, existe un área relevante de investigación que se ha centrado en los grandes beneficios del ejercicio físico sobre la salud mental (p.ej., Paluska & Schwenk, 2000), tanto en la disminución del riesgo de padecer alteraciones mentales (ansiedad, depresión, etc.) como sobre el tratamiento de estas alteraciones. En este sentido, diferentes investigadores han estudiado el efecto del ejercicio físico en la prevención de enfermedades crónicas y trastornos mentales.

En la última década, ha habido un especial interés por el conocimiento de la relación existente entre el rendimiento cognitivo y la práctica regular de ejercicio físico (Hillman, Erickson & Kramer, 2008). Por esta razón, estamos interesados en los experimentos que muestren intervenciones de entrenamiento en las que se puedan ver posibles vinculaciones causa-efecto (relación entre el ejercicio físico y la vigilancia o atención sostenida). Sin embargo, hasta el momento no hemos encontrado ninguna y por ello hemos abordado este experimento de forma exploratoria.

A continuación procederemos a focalizar nuestro proyecto de tesis. De hecho, comenzaremos haciendo hincapié en la relación existente entre el ejercicio físico puntual y el funcionamiento cognitivo. Por ello, en primer lugar realizaremos una revisión de los

² Por actividad física se entiende cualquier movimiento corporal producido por los músculos esqueléticos y que resultan en gasto energético por encima del metabolismo basal (Shephard & Balady, 1999). Por ejercicio físico se entiende toda aquella actividad física realizada de forma estructurada y organizada para conseguir mejorar la forma física y la salud. Para diferenciarse de la actividad física, el ejercicio físico debe cumplir los siguientes requisitos: 1) El ejercicio físico requiere de una planificación previa y debe elegirse y adaptarse cuidadosa y meditamente; 2) el ejercicio físico debe realizarse regularmente. De hecho, nuestro cuerpo exige estímulos continuos y repetidos que establezcan cambios perdurables; 3) requiere de una intensidad y duración adecuada a los objetivos que se pretendan alcanzar y 4) debe ser medible y cuantificable. Por deporte se entiende cualquier ejercicio físico que tiene como principal objetivo la diversión (juego). El deporte está sujeto a normas y su práctica supone un entrenamiento previo. Las investigaciones presentadas en la presente tesis doctoral se centraran en el ejercicio físico.

efectos a nivel fisiológico que produce la realización del ejercicio físico puntual, para posteriormente realizar una breve revisión sobre las primeras concepciones, modelos y teorías que han estudiado las interacciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición. A continuación, nos centraremos en los efectos del ejercicio físico agudo sobre el sistema cognitivo. Finalmente, focalizaremos nuestra atención en la vigilancia como función cognitiva clave en la relación entre ejercicio físico puntual y la cognición.

Tras esta primera parte de la Introducción, centrada en los efectos del ejercicio físico puntual en el funcionamiento cognitivo, pasaremos a nuestro objetivo secundario que se centra en los efectos del ejercicio físico realizado de forma regular sobre la cognición. De hecho, seguiremos una estructura similar a la primera parte de nuestra introducción. Así, en primer lugar nos centraremos en los cambios fisiológicos inducidos por la realización del ejercicio físico regular, para posteriormente centrarnos en los efectos del ejercicio físico regular en el funcionamiento cognitivo y finalmente terminar en nuestro mecanismo cognitivo de estudio, la vigilancia, y estudiarla como función cognitiva clave en la relación entre el ejercicio físico regular y la cognición.

2.2. Ejercicio físico puntual y cognición

2.2.1 Cambios fisiológicos inducidos por la realización del ejercicio físico puntual.

Desde un punto de vista fisiológico, toda realización de un ejercicio físico altera y provoca variaciones en la mayoría de sistemas y órganos de la persona que lo desempeña. La literatura ha mostrado la gran variedad de efectos puntuales del ejercicio físico sobre el organismo. A continuación, vamos a proceder a resumir algunos de los cambios fisiológicos más relevantes (Wilmore & Costill, 2007).

Cambios fisiológicos producidos sobre el sistema cardiovascular.

Mientras realizamos ejercicio físico puntual se producen diferentes cambios sobre el sistema cardiovascular. Entre todos ellos, es muy destacable el incremento de frecuencia cardíaca (FC). A su vez, estos incrementos de FC producen aumentos en el gasto cardíaco, implicando una redistribución del flujo sanguíneo. Además, también se producen aumentos del caudal sanguíneo periférico, principalmente a nivel muscular. Por otro lado, también son destacables los aumentos en la presión arterial sistólica en relación a los incrementos de la intensidad del ejercicio. Mientras, la presión arterial diastólica se mantiene, e incluso en algunos casos disminuye levemente. En relación a la sangre, es

preciso mencionar que el ejercicio físico produce incrementos de la diferencia arteriovenosa de oxígeno en sangre. Generalmente, esto es debido al incremento del consumo de oxígeno por parte de los músculos y a la hemoconcentración, sobre todo si se produce una sudoración desmesurada.

Cambios fisiológicos producidos sobre el sistema respiratorio.

Es bien sabido que la realización de ejercicio físico origina un incremento de la ventilación pulmonar. Debido a la intensificación de actividad muscular, el consumo de oxígeno se incrementa, por lo que la perfusión de O_2 en los alvéolos pulmonares se debe incrementar para suplir las necesidades de los músculos. Además, la realización de ejercicio físico con exigencia de un alto porcentaje de $V_{O_{2m\acute{a}x}}$, conlleva un aumento de la ventilación y aumento de los volúmenes respiratorios para mantener las concentraciones apropiadas de O_2 y CO_2 , por lo que aumentan los requerimientos de O_2 y es necesario eliminar la excesiva producción de CO_2 mediante la ventilación alveolar (hiperventilación).

Cambios fisiológicos producidos sobre el sistema neuroendocrino

La gran mayoría de ejercicios físicos demandan de la activación del sistema nervioso simpático para poder activar las funciones de nuestros órganos; por ejemplo, en el caso del corazón, el sistema simpático ayuda a aumentar la frecuencia cardíaca y la fuerza contráctil del ventrículo. Además, la activación del Sistema Nervioso Simpático (SS) incrementa los niveles de fuerza, produce gran cantidad de secreción de hormonas, etc. Sin embargo la activación del SNS, produce una inhibición del sistema parasimpático.

Por otro lado, durante el ejercicio físico, el número de órdenes enviadas desde el sistema nervioso central (SNC) aumenta de forma exponencial. Este proceso podría causar un aumento en el umbral de excitación de la membrana, por lo tanto, la intensidad de los estímulos eferentes debería ser mayor para que se produzca y se mantenga su efecto. Además, generaría una fatiga neural, causado por el agotamiento o disminución de los neurotransmisores durante el ejercicio físico realizado de forma extenuante.

Otros cambios fisiológicos producidos por el ejercicio físico puntual.

La práctica del ejercicio físico puntual produce otros efectos importantes sobre los diferentes sistemas y órganos. Entre otros, podemos destacar algunos de los siguientes.

- Incremento de la temperatura corporal.
- Incrementos en la concentración de ácido láctico.
- Aumentos en la secreción de neurotransmisores, como son la noradrenalina (Dishman, 1997), endorfinas (Hoffman, 1997) o serotonina (Chaouloff, 1997)
- Aumentos en la absorción de O₂ para satisfacer las demandas energéticas requeridas principalmente por los músculos (Wilmore & Costill, 2007).
- Liberación de productos de desecho (ácido láctico, urea, CO₂...).
- Disminución del pH, debido al ácido láctico y los radicales libres.
- Pérdida de electrolitos a través del sudor.
- Aumenta la deshidratación y, como contraprestación, disminución de la producción de orina.

En relación al efecto del ejercicio sobre la cognición, las respuestas fisiológicas más relevantes son: los incrementos del flujo sanguíneo cerebral, los aumentos de la temperatura general y sobre todo los incrementos de los neurotransmisores (serotonina, noradrenalina o dopamina), ya que es bien sabido que benefician directamente al metabolismo cerebral y al rendimiento cognitivo (p. ej., en la atención). Destacamos entre todos los anteriores el flujo sanguíneo y la concentración de sustancias metabólicas como unos de los factores más importantes a la hora de cuantificar la magnitud del metabolismo cerebral (Secher, Seifert & Van Lieshout, 2008). De hecho, el volumen del flujo del sanguíneo que está directamente relacionado con la presión arterial de dióxido de carbono (PaCO₂), variará según la intensidad del esfuerzo realizado. Así, podríamos observar una disminución al realizar esfuerzos de alta intensidad, produciendo a su vez una reducción del flujo sanguíneo cerebral (Nielsen et al., 2002) y consecuentemente, esta disminución en el flujo sanguíneo cerebral reducirá la correcta oxigenación del cerebro (Rasmussen et al., 2006). De esta forma, se provocará una disminución de los recursos metabólicos disponibles en las zonas cerebrales (Secher et al., 2008).

Tras abordar de forma general (y concisa) los cambios fisiológicos que provoca el ejercicio físico puntual, procederemos a revisar la literatura sobre los modelos y teorías que han estudiado las interacciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición.

2.2.1. Contextualización y evolución histórica: Teorías, concepciones y modelos que han estudiado las interacciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición.

El primer científico en proporcionar una base teórica para la hipótesis de que el ejercicio físico puntual tendría efectos sobre la cognición fue Davey (1973). Davey veía el ejercicio físico como un factor estresor que podría afectar al arousal del individuo de la misma manera que otros factores de estresantes tales como: la ansiedad o la temperatura. Así, la hipótesis de Davey se basaba principalmente en la teoría de Yerkes & Dodson (1908). De acuerdo con esta teoría, el rendimiento de una persona aumenta linealmente con el nivel de arousal hasta alcanzar un punto de inflexión, un máximo (punto óptimo) a partir del cual cualquier aumento en el nivel de arousal trae consigo un importante deterioro en la ejecución de la tarea. Según esta teoría, cuando un deportista presenta niveles bajos de arousal, la calidad de su rendimiento estará por debajo de sus posibilidades (rendimiento bajo). Por el contrario, cuando los niveles de activación aumentan hasta un nivel moderado, el rendimiento irá aumentando también hasta un punto óptimo de ejecución. No obstante, si el arousal continúa aumentado, el rendimiento volverá al mostrado durante niveles bajos de arousal y se esperan descensos en la calidad y eficacia de la ejecución. Así, cuando esta teoría se representa gráficamente, el rendimiento se muestra gráficamente con una forma de U invertida. Por todo ello, en muchas ocasiones se podrá conocer a la teoría de Yerkes & Dodson, como la teoría de la U invertida (ver Figura 1 para más información).

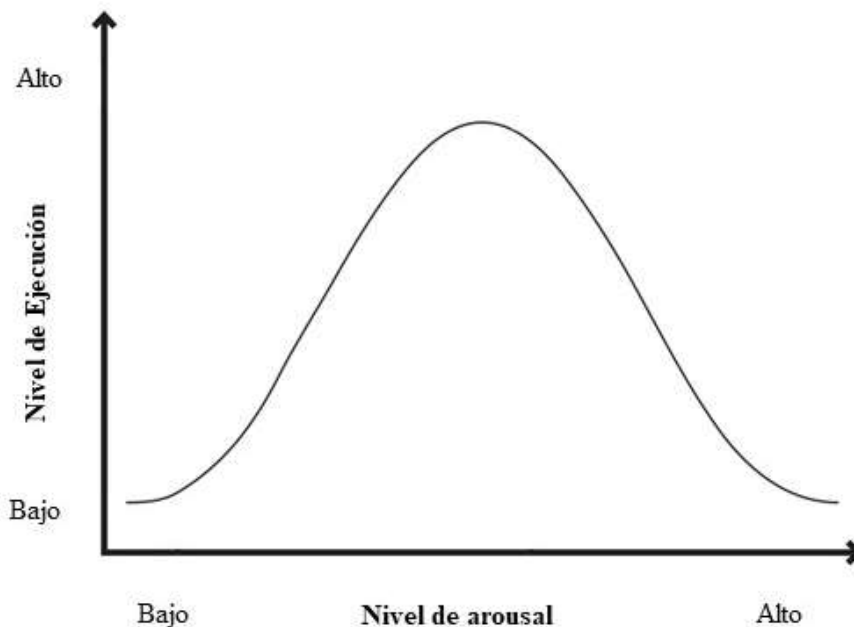


Figura 1: Representación gráfica de la teoría de Yerkes & Dodson (1908).

En base a esta teoría, Davey afirmó que durante un estado de reposo y durante la realización de un ejercicio de baja intensidad, el rendimiento de los deportistas sería pobre. Sin embargo, cuando la intensidad de ejercicio aumenta hacia niveles moderados, el rendimiento sería óptimo. Posteriormente, al igual que sucede en la teoría de Yerkes & Dodson, un aumento adicional en la intensidad de ejercicio significaría un retorno a un nivel de rendimiento bajo. Yerkes & Dodson (1908) también observaron en experimentación animal, que la complejidad de la tarea modulaba la pureza de la curva de la U invertida. Así, en sus resultados encontraron que si una tarea era fácil, la curva se inclinaba hacia el extremo más alto del continuo de arousal, pero si la tarea era compleja, estaba sesgada de forma inversa. En otras palabras, las tareas fáciles requieren niveles relativamente altos de arousal para un rendimiento óptimo, mientras que las tareas complejas requieren niveles relativamente bajos de arousal (ver Figura 2).

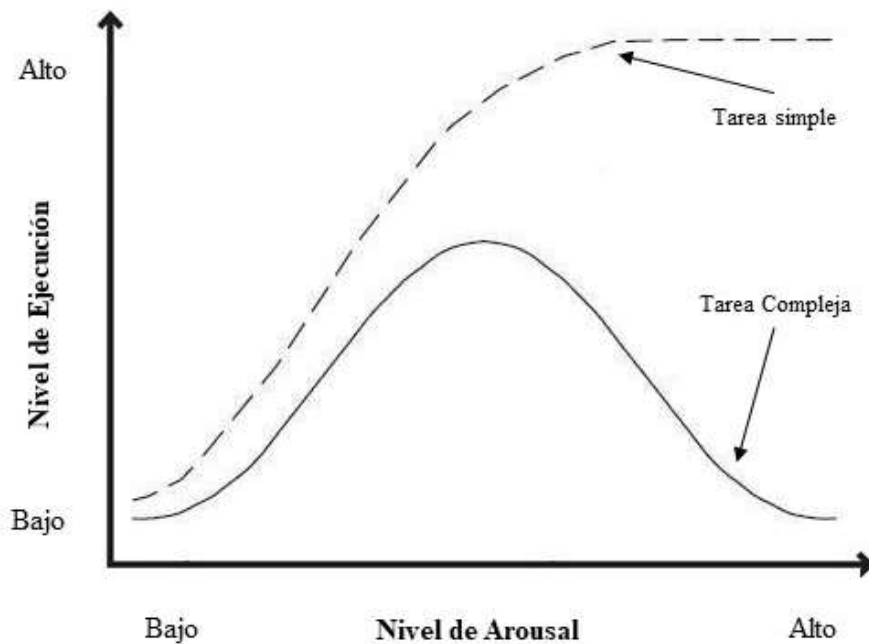


Figura 2: Comparación del tareas simples vs tareas complejas. Yerkes & Dodson (1908).

Con el paso de los años, la teoría de la U invertida siguió desempeñando un papel relevante como teoría subyacente con respecto a la investigación referente en la búsqueda de relaciones entre el ejercicio puntual y la cognición. De hecho, estudios realizados posteriormente defienden los principios de la teoría de la U invertida (p. ej., Allard et al., 1989; Fleury, Bard & Carrière, 1981; Isaacs & Pohlman, 1991). Sin embargo, la teoría se

fue reformulando con el paso del tiempo. Por ejemplo Easterbrook (1959) dio un paso más y buscó la relación existente entre la teoría de la U invertida y la eficacia del procedimiento descrito por Yerkes & Dodson (1908). Así, en relación con la teoría de la U invertida haremos referencia a la teoría de utilización de señales propuesta por Easterbrook (1959).

Eastbrook (1959) desarrolló su teoría para explicar la manera en que las variaciones en el esfuerzo físico producen cambios en los procesos de atención. Es decir, cuando se realiza ejercicio físico hay una restricción progresiva del número de señales a las que se atiende en función del incremento del arousal. Por lo tanto, en situaciones de arousal bajo el individuo tiene un enfoque de atención demasiado amplio y se ocupa de información relevante e irrelevante; como resultado el rendimiento es pobre. A medida que aumenta el arousal, la atención alcanza un nivel óptimo, procesando claves relevantes para la tarea. Esto corresponde a la parte superior de la curva U invertida en la teoría de Yerkes & Dodson explicada anteriormente. Sin embargo, si el arousal continua subiendo, la atención descenderá (no procesando señales relevantes) y empeorando el rendimiento (ver Figura 3 para su comprensión).

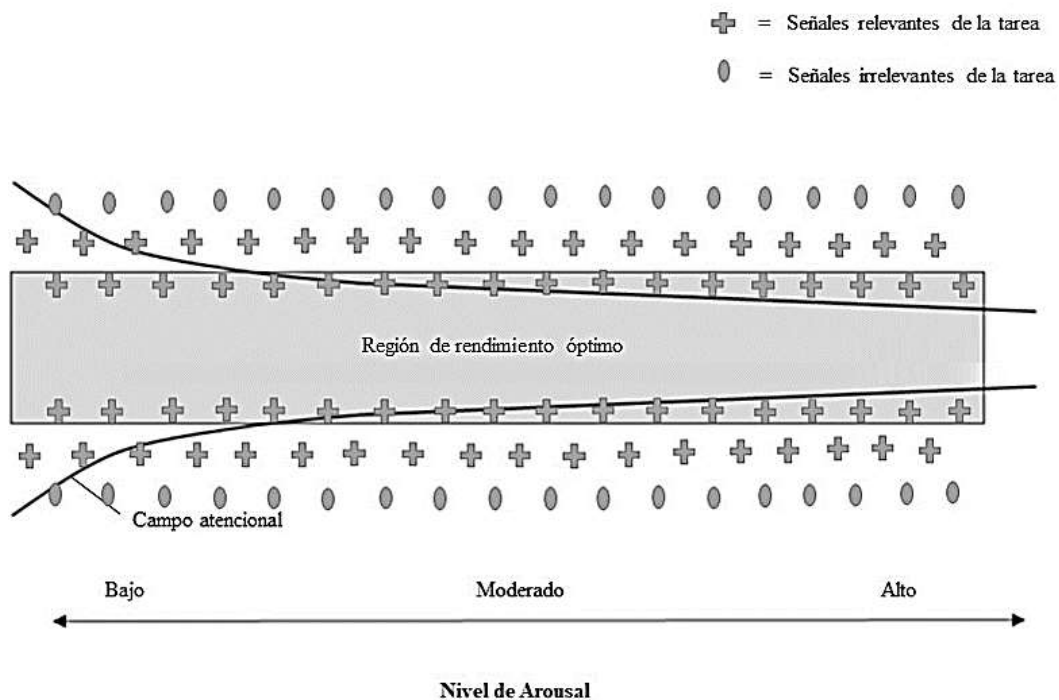


Figura 3: Diagrama descriptivo de la teoría de utilización de señales de Easterbrook. Modificada de Easterbrook 1959.

Años más tarde, se produjo un interés renovado por la temática que se aborda en este trabajo (p. ej., Arcelin, Delignières & Brisswalter, 1998; Brisswalter, Arcelin, Audiffren & Delignières, 1997; Collardeau, Brisswalter & Audiffren, 2001; Delignières, Brisswalter & Legros, 1994; McMorris & Graydon, 1996a, 1996b, 1997; McMorris & Keen, 1994), intentando dar explicación a las relaciones existentes entre el ejercicio físico puntual y la cognición. De hecho, los científicos mencionados anteriormente volvieron hacia lo que se conocía como teorías de los recursos asignables, también conocidas como teorías cognitivo-energéticas (Kahneman, 1973; Sanders, 1983).

Estas teorías (recursos asignables o cognitivo-energéticas) de origen multidimensional, son capaces de explicar posibles interacciones entre el factor estresor y la tarea a realizar. En este sentido, una de las teorías más conocida es la de Kahneman (1973). Esta teoría cree que todos los individuos tenemos una cantidad de recursos limitados y que a medida que aumenta el arousal también aumenta el número de recursos disponibles dentro de nuestro cerebro. Así, de la misma forma que la teoría de Yerkes & Dodson demostró que el aumento del arousal es beneficioso para el rendimiento hasta cierto punto y que posteriormente habrá un retorno a los niveles con los que se comenzó, Kahneman también lo hizo. Sin embargo, Kahneman manifiesta su desacuerdo con la teoría Yerkes & Dodson, ya que para él el arousal no es el único factor estresor que afecta el rendimiento y sugiere que para que una actividad en particular pueda ser llevada a cabo, se requiere una serie de recursos en particular que le son proporcionados por medio del arousal inducido.

La asignación de recursos para la información relevante de la tarea en cuestión se lleva a cabo mediante un esfuerzo cognitivo y depende de la política de distribución de recursos del individuo. De hecho, Kahneman cree que hay cuatro factores que afectan a esta política de asignación de recursos: 1) Disposiciones estables: son las reglas que gobiernan la atención involuntaria, lo que convencionalmente se denomina respuestas de orientación, son reacciones a características estimulares como la novedad, cambio repentino en alguna dimensión del estímulo, etc. 2) Intenciones transitorias: se refieren a los esquemas o criterios activados por un individuo para una tarea particular en un momento dado. 3) Evaluación de las demandas de capacidad: son evaluaciones que hace el individuo que permiten establecer la cantidad de esfuerzo que demanda una actividad concreta, el consumo relativo de recursos atencionales de cada tarea o proceso. De acuerdo con Kahneman, la persona decide si tiene o no capacidad suficiente, en ese momento, para poder hacer lo que se requiere y 4) Efectos del arousal: se refiere a la

compleja relación entre arousal y capacidad atencional. Kahneman (1973) creía que durante los niveles moderados arousal, el esfuerzo puede fácilmente asignar recursos a la tarea. Esto no difiere de Yerkes & Dodson (1908) o Easterbrook (1959); sin embargo, durante los altos niveles de excitación, Kahneman creía que el individuo no sería capaz de asignar recursos a la tarea (Ver Figura 4 para su correcta comprensión).

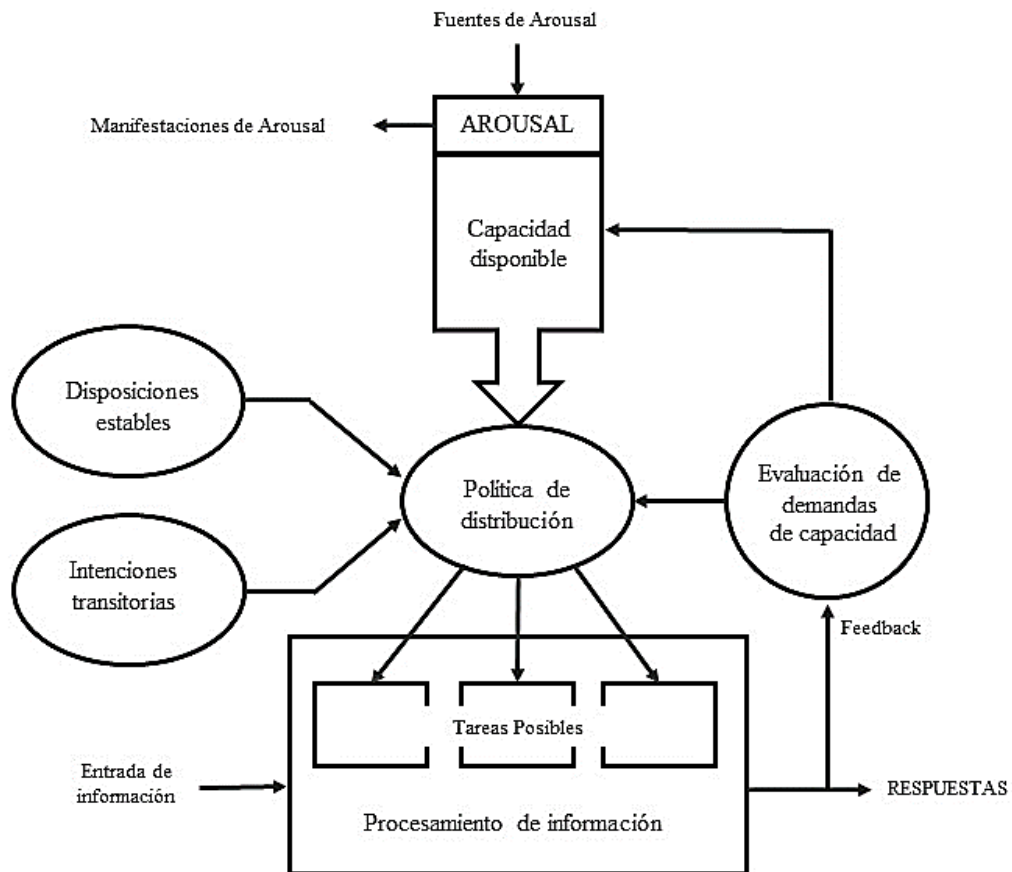


Figura 4: Esquema del modelo de Kahneman. Adaptado de Kahneman, 1973.

Posteriormente, Sanders (1983) adoptó un enfoque similar al de Kahneman (1973), pero con algunas diferencias significativas. De hecho, Sanders argumentó que las diferentes etapas del proceso cognitivo necesitaban ser estimuladas por diferentes mecanismos energéticos. Entre ellos estaban la arousal/excitación, activación, los mecanismos de evaluación y el esfuerzo. En este modelo, Sanders vio el arousal/excitación como un mecanismo energético de tipo fásico que afectaría a la disposición para procesar la entrada de información y la activación fue concebida como otro mecanismo energético para la preparación para la respuesta. Por otro lado, se

consideró que el papel del mecanismo de evaluación fue el de proporcionar un esfuerzo (estados fisiológicos de los mecanismos de excitación y activación) con información sobre el resultados de la respuesta (ver Figura 5 para su correcta interpretación).

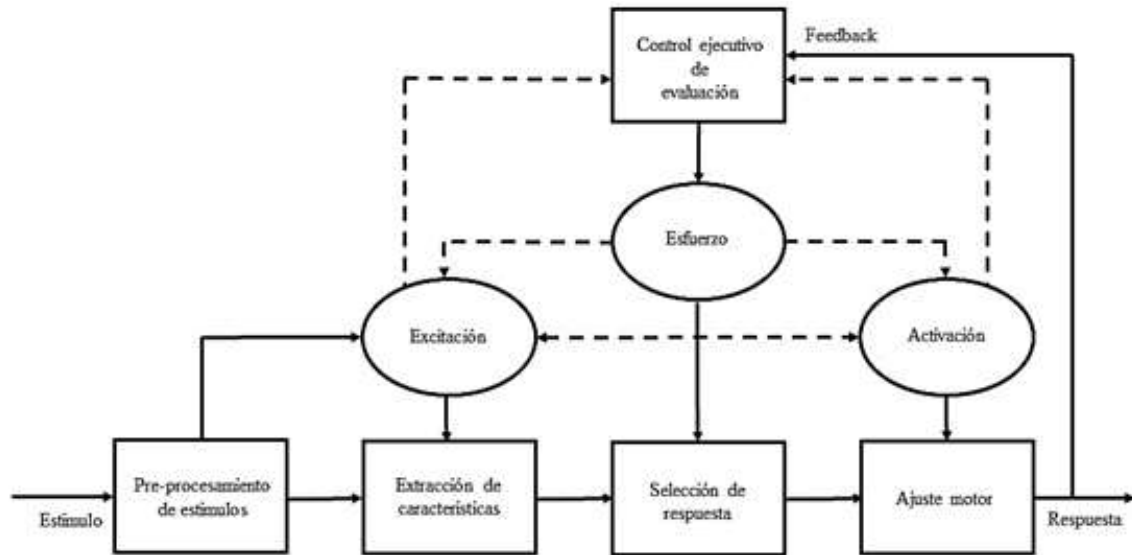


Figura 5. Modelo cognitivo-energético de Sanders (Modificado de Sanders, 1983).

En este mismo sentido, Audiffren et al., (2009) observaron con exhaustividad consideraron la teoría cognitivo-energética de Hockey (1997), conocida tradicionalmente como la teoría del control compensatorio, como una teoría particularmente útil para explicar la interacción ejercicio físico puntual y cognición. Hockey afirma que tenemos dos bucles de regulación del rendimiento: 1) Bucle de control automático: este bucle funciona sin esfuerzo y es el encargado de regular las habilidades bien aprendidas. Incluye un mecanismo llamado monitor de acción, que compara los resultados que se pretenden alcanzar (objetivos) con los resultados que finalmente se alcanzan (realidad). Este mecanismo de control automático, si detecta una discrepancia o irregularidad, realiza un ajuste en la asignación de recursos para realizar correctamente en ensayos futuros y 2) Bucle de control de esfuerzo: trata de mantener el rendimiento a pesar de las interferencias de los factores estresores. Es sensible a las exigencias impuestas en el mecanismo de control automático y trata o no de hacer frente a los problemas que se plantea. Así, está información recibida se transmite al controlador supervisor, el cual decide sobre la acción compensatoria que se debe tomar para resolver la situación o problema planteado (Figura 6).

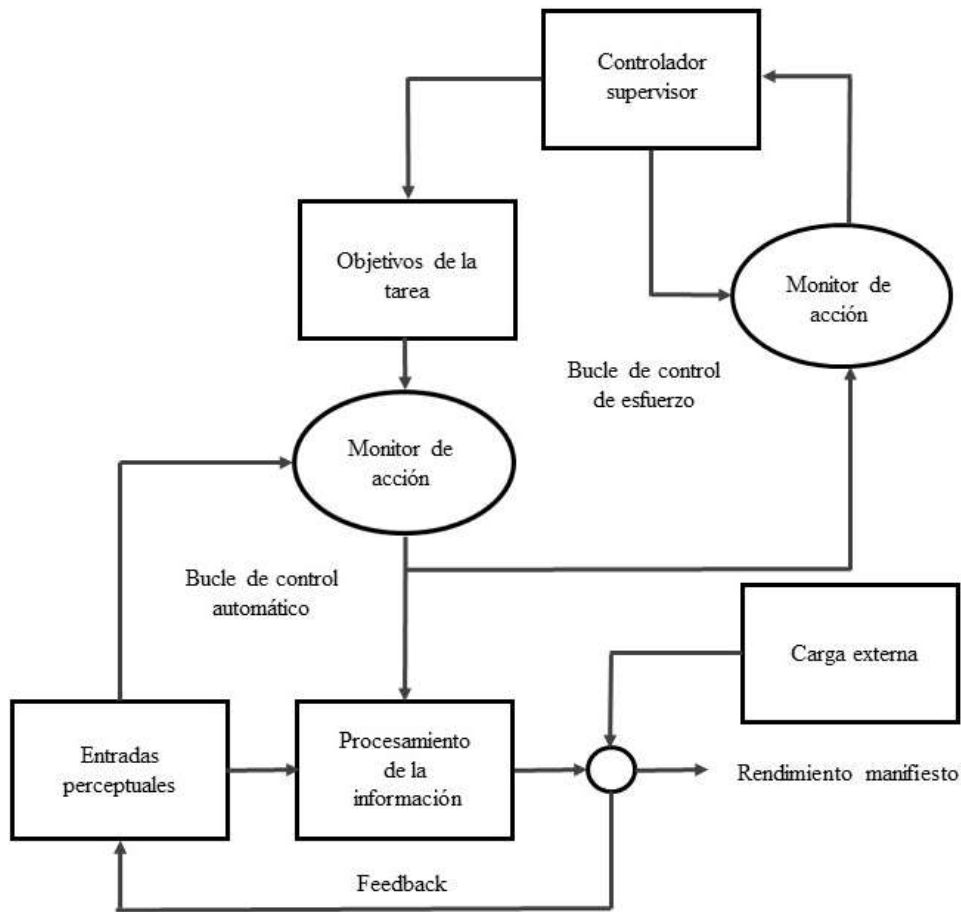


Figura 6: Modelo de control compensatorio de Hockey

De forma general, la mayor parte de investigaciones encontradas en la literatura que han buscado algún tipo de relación entre ejercicio físico puntual y la cognición, tales como las que hemos visto anteriormente, han diferido de la teoría en la que han fundamentado conceptualmente su trabajo. Sin embargo, la gran mayoría han elegido o sugerido un enfoque o planteamiento de U invertida.

Los anteriores tipos de planteamientos llevaron a una nueva conceptualización sobre las teorías mostradas hasta el momento. De hecho, McMorris & Keen, (1994), sugirieron con prudencia que quizás el arousal/excitación inducido por el ejercicio se podría comparar con la excitación emocionalmente inducida. Estos científicos aceptan que el ejercicio es un estresor y sugieren la idea de que el ejercicio a intensidad moderada induciría un rendimiento óptimo. Sin embargo, no están seguros de que podría pasar con el ejercicio físico a una intensidad alta, ya que no debería percibirse necesariamente como

algo angustioso por el individuo. Años más tarde, McMorris & Graydon, (1996b) se preguntaron si la teoría de la U invertida podría proporcionar una base afectiva para los estudios que buscaban relaciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición. De hecho, estos investigadores buscaron apoyo en la teoría del impulso (Hull, 1943) para justificar de forma válida esta interacción. Así, según la teoría del impulso sugieren que los aumentos en el arousal se podrán traducir en una mejora en el rendimiento si la tarea está bien aprendida (automatización de la tarea). Si la tarea es novedosa, los aumentos en el arousal no tendrán efecto o resultaran con un empeoramiento en el rendimiento. En este sentido, las tareas bien aprendidas pueden ir mejorando a medida que aumente el arousal. Por el contrario, si las tareas son novedosas y no existe automatización de la tarea, es muy posible que no se encuentre ningún efecto o que se encuentre un gran deterioro a altos niveles de arousal. (Véase la Figura 7).

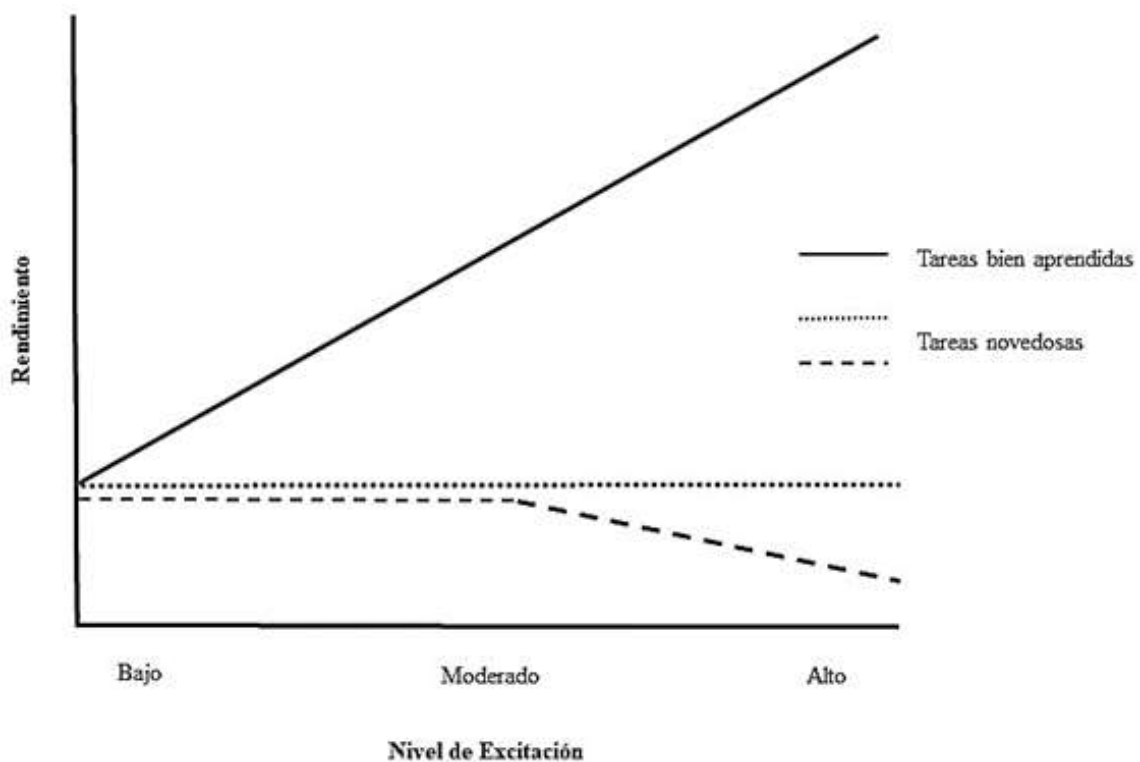


Figura 7. Interacción entre el rendimiento y el arousal de acuerdo con la teoría del impulso.

McMorris & Graydon (1996b) también señalaron a la teoría de Douchamp (1988) sobre el desempeño operacional como posible fundamento teórico para mostrar la interacción entre el ejercicio físico puntual y la cognición. Douchamp afirmó que el

arousal tenía una naturaleza tridimensional (dimensiones energéticas, computacionales y emocionales). En este sentido, él sugería que el sistema nervioso central (SNC) daría prioridad a las dimensiones más energéticas a expensas de las otras dimensiones. Sugería que la excitación energética es una disposición a actuar físicamente y, por lo tanto, sólo afecta positivamente a los actos motores. Por lo tanto, creía que el ejercicio puntual podría tener un efecto negativo en la cognición. Douchamp defendió su teoría argumentando que el SNC posee recursos limitados y por lo tanto, si una dimensión necesita más recursos, debe ser a expensas de otras dimensiones.

Esto tiene similitud con la hipótesis de la hipofrontalidad transitoria de (Dietrich, 2003, 2006). Esta teoría sugiere que al realizar alguna actividad demandante, el estado de conciencia se ve alterado y se puede producir una inhibición del córtex prefrontal, especialmente del córtex dorsolateral, encargado de la atención selectiva, la planificación y el análisis, la autorreflexión y la memoria de trabajo. Así, la inhibición del córtex prefrontal (dorsolateral), que es selectiva, reduce la actitud crítica y analítica por lo que permite una sensación de “dejarse llevar” hacia la actividad más demandante en ese momento. Durante el ejercicio, esta teoría sugiere que existe una activación masiva y sostenida de los sistemas motores y sensoriales en detrimento de la actividad en otras estructuras neuronales. Por esta razón, se produce una inhibición temporal de las regiones cerebrales que no son esenciales para ejecutar el ejercicio específico que ocupa en ese momento.

La hipótesis de la hipofrontalidad transitoria de Dietrich es una de las más utilizadas para argumentar el empeoramiento del funcionamiento atencional que había sido causado durante la realización de un ejercicio físico puntual. En este sentido, esta hipótesis afirma que cuando un individuo está realizando un ejercicio físico de cierta intensidad, el propio ejercicio realizará un consumo de una gran cantidad de recursos metabólicos para poder mantener el nivel de funcionamiento de las áreas cerebrales involucradas en el procesamiento motor. Esto desencadenará un déficit de recursos metabólicos disponibles para otra regiones cerebrales responsables del procesamiento cognitivo, induciendo a su vez una disminución en el rendimiento de ciertas funciones cerebrales, y más concretamente en la red de control de ejecutivo (Dietrich, 2003, 2006).

Por último, hablaremos de la teoría Humphreys & Revelle (1984) que consideraba el efecto de constructos de personalidad (e.g. estado de ansiedad, motivación, etc.) en combinación moderadores situacionales (e.g. momento del día, dificultad de la tarea, etc.). Esta teoría también se alejó de las perspectivas teóricas que eligieron la teoría de la

U invertida como base de su estudio. Humphreys & Revelle veían el arousal como un estado de alerta, vigor o activación, mientras que consideraban el esfuerzo como un estado de motivación para conseguir estar implicado en una tarea (Ver Figura 8).

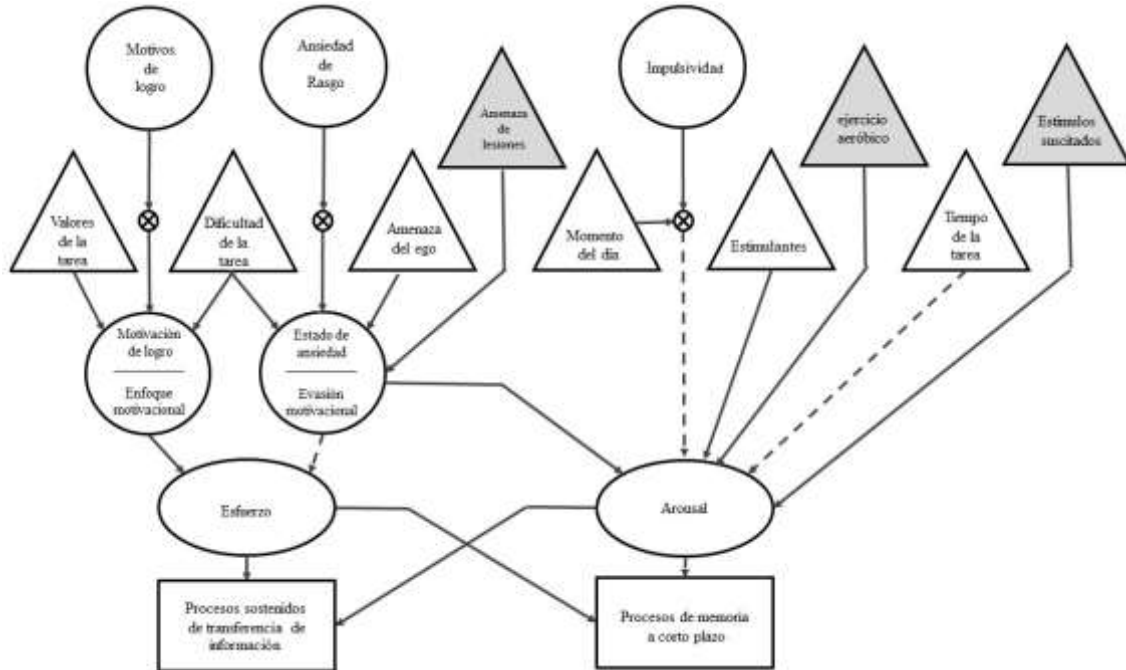


Figura 8. Modelo de Humphreys & Revelle (1984).

Como bien hemos dicho anteriormente, esta teoría no creían que existiera una relación de U invertida entre el arousal y el rendimiento. Consideraba que los aumentos de arousal resultaban beneficiosos en “tareas sostenidas de transferencia de información” (tareas que requerían atención y alerta), pero perjudiciales para tareas de memoria a corto plazo. Esta hipótesis creía que los aumentos de arousal y en el esfuerzo de tarea podrían facilitar el rendimiento. Por lo tanto, se podría demostrar una mejora lineal en el rendimiento. Esta sugerencia fue similar a la propuesta de Hull (1943) para tareas bien aprendidas (ver figura 6). Sin embargo, en tareas con requerimientos de memoria a corto plazo, el rendimiento se vería afectado negativamente a altos niveles de arousal, pero no a niveles moderados. Sin embargo, para las tareas que demandan tanto la transferencia sostenida de información como la memoria a corto plazo se podría mostrar un efecto de U invertida. Por consiguiente, en tareas sostenidas de transferencia de información se verían facilitadas por un aumento del arousal y por el esfuerzo en tarea, por lo que habría una mejora en el rendimiento a niveles moderados de arousal. Sin embargo durante los

altos niveles de arousal, los efectos negativos sobre los procesos de memoria a corto plazo se inhibirán, negando así los efectos positivos sobre la transferencia de información sostenida. Por lo tanto, habría un retorno a los niveles de rendimiento basales.

Una vez realizada la revisión histórica sobre las primeras concepciones, modelos y teorías que han estudiado las interacciones entre el ejercicio físico puntual y la cognición, vamos a pasar a describir de forma general los efectos del ejercicio físico en funcionamiento cognitivo.

2.2.3. Efectos del ejercicio físico puntual en el funcionamiento cognitivo.

Son bien conocidas las investigaciones que han señalado la repercusión del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (ver revisiones de Lambourne & Tomporowski, 2010; McMorris & cols., 2009; Tomporowski, 2003). Específicamente, el número de estudios que han explorado las anteriores investigaciones ha incrementado en los últimos años (Tomporowski, Lambourne & Okumura, 2011). Destáquese aquí que los primeros estudios que buscaban relaciones entre el ejercicio físico y la cognición examinaron el procesamiento de la información mediante tareas de detección de letras, de búsqueda visual, de tiempo de reacción (TR) simple y elección o tareas de discriminación perceptual (Tomporowski, 2003). Sin embargo, los estudios más recientes, examinaron de forma más destacada las funciones ejecutivas (Hillman et al., 2009; Kamijo et al., 2004; Kamijo y et al., 2007, 2009; Pontifex et al., 2013; Scudder et al., 2012).

La literatura existente no nos proporciona resultados consistentes y aclaradores de la relación entre el ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo. De hecho, podemos encontrar una gran cantidad de estudios que muestran diversos resultados (empeoramiento, mixtos o de mejora). Por un lado, encontramos los estudios que encontraron un deterioro del ejercicio físico puntual sobre el rendimiento cognitivo (Fery et al., 1997; Isaacs & Pohlman, 1991; McMorris & Keen, 1994). Por ejemplo, McMorris & Keen, (1994) examinaron a 12 deportistas recreativos y estudiaron la relación existente entre el ejercicio físico realizado a tres intensidades de ejercicio [descanso, 70% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ (ejercicio moderado), 100% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ (ejercicio fatigante)] y el rendimiento cognitivo valorado por una tarea de TR simple. Los resultados mostraron que el TR durante el 100% $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ fue significativamente más lento que en las otras dos condiciones que no difirieron significativamente entre sí. Por otro lado, encontramos los estudios que

informaron sobre datos mixtos o ambiguos para los efectos del ejercicio agudo sobre el rendimiento cognitivo (ver Chang y cols., 2012 para una revisión). Principalmente, esto puede deberse a las cantidad de protocolos usados, tareas empleadas, funciones cognitivas estudiadas, etc. (Adam et al., 1997; Arcelin et al., 1998; Cian et al., 2001; Cian et al., 2000; Davranche et al., 2005, 2006; Dietrich & Sparling, 2004; Fery et al., 1997; Fleury & Brad, 1987; Heckler & Croce, 1992; Hillman et al., 2003; Hogervorst et al., 1996; Paas & Adam, 1991). Por último, se ha evidenciado que el ejercicio físico puntual también puede producir una facilitación en el rendimiento cognitivo (Arcelin et al., 1997; Gondola, 1987; Tomporowski et al., 2005). Por ejemplo, Arcelin et al., (1997) examinaron el efecto de un ejercicio físico puntual al 60% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ sobre una tarea de TR de elección. Los resultados de las tareas cognitivas fueron recogidos en reposo, después de 3' de ejercicio y después de 8' de ejercicio. Los resultados indicaron que el TR fue significativamente más rápido tras las dos condiciones de ejercicio, con respecto a la condición en reposo. Posteriormente, Audiffren, Tomporowski & Zagrodnik (2008) y Collardeau, Brisswalter & Audiffren (2001) mostraron una reducción en los TRs tras la realización de un ejercicio físico puntual. Sin embargo, esta mejora en los TRs duró poco tiempo. En otras palabras, los efectos del ejercicio físico puntual sobre la disminución de los TRs tan solo duraron unos minutos tras el cese del ejercicio físico.

Otro estudio realizado por Pesce et al., (2002), examinó el efecto de un ejercicio físico puntual al 60% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ y en reposo sobre una tarea atencional para medir la reorientación atencional. Los resultados mostraron que durante el ejercicio físico al 60% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ se facilitó en general la velocidad de reacción y además, la intensidad del ejercicio provocó un aumento de la flexibilidad de desplazamiento produciendo un amplio enfoque atencional en el espacio visual.

Por lo tanto, los resultados obtenidos implican que los mecanismos energéticos que impulsan el efecto facilitatorio del ejercicio sobre los TRs dependen del ejercicio físico, debido a que la realización de un esfuerzo físico produce un aumento del arousal que será el principal causante de la disminución de los TRs (e.g., McMorris & Graydon, 2000). Posteriormente, el aumento del arousal irá desapareciendo de forma progresiva tras finalizar el ejercicio físico (Audiffren et al., 2008).

Relevantes para este importante tópico de investigación, son las investigaciones referentes al comportamiento de la orientación espacial exógena tras o durante la realización de un ejercicio físico puntual. Por ejemplo, Sanabria et al., (2011), investigaron los efectos del ejercicio físico puntual sobre la orientación espacial exógena.

Para ello, Sanabria y sus colaboradores usaron una tarea de discriminación en tres condiciones de actividad distintas (reposo, durante y después). Los resultados de este estudio mostraron que el ejercicio físico aeróbico aumentó la capacidad de redirigir la atención espacial de los participantes hacia lugares que habían sido previamente atendidos. En este mismo sentido, otro estudio importante de Llorens, Sanabria & Huertas (2015) demostraron en participantes con baja condición física que tras finalizar un ejercicio físico existe una modulación en el funcionamiento de la orientación espacial exógena, observando una reducción en la captura atencional, efecto producido por los estímulos distractores que aparecen en el campo visual.

Aunque se han encontrado gran diversidad de resultados, la mayoría de las investigaciones sugirieron un efecto positivo del ejercicio sobre el rendimiento cognitivo. Como bien venimos diciendo, un moderador importante que influyó en los resultados obtenidos en la literatura fue la intensidad del ejercicio. De hecho, cuando se utilizó un protocolo de ejercicio a intensidad moderada (entre el 40% y el 60% del $VO_{2m\acute{a}x}$ o de la frecuencia cardiaca máxima) con una duración de entre 20 y 60 minutos, la mayoría de las investigaciones mostraron un efecto positivo (Arcelin et al., 1997; Gondola, 1987; Tomporowski et al., 2005) o una tendencia positiva (Adam et al., 1997; Arcelin et al., 1998; Cian et al., 2001; Davranche et al., 2005, 2006; Dietrich, 2003; Fery et al., 1997; Fleury & Brad, 1987; Heckler & Croce, 1992; Herrmann et al., 2006; Hogervorst et al., 1996; Paas & Adam, 1991) para la relación entre el ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo.

Cuando los estudios se revisan de forma meta-analítica, los resultados sugieren que el ejercicio físico puntual mejora el funcionamiento ejecutivo en niños, preadolescentes y adolescentes (ver Verburgh et al., 2013). Sin embargo, los resultados de otros dos meta-análisis han sido contradictorios. Así, por ejemplo, Chang et al., 2012 mostraron un pequeño efecto significativo y positivo (tamaño del efecto = 0.101) y Lambourne & Tomporowski (2010) informaron de un pequeño, significativo y negativo efecto (tamaño del efecto = -0.14) para el ejercicio sobre el rendimiento cognitivo durante la actividad física. En definitiva, las revisiones cualitativas y meta-análisis dentro del tema de investigación que ocupa a la presente tesis doctoral sugieren la existencia de una pequeña relación positiva entre ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo.

De forma general, la literatura ha sugerido que el ejercicio físico aumenta el nivel de arousal durante el ejercicio físico puntual de intensidad moderada, probablemente debido al aumento de las concentraciones cerebrales de los neurotransmisores de

dopamina y norepinefrina (Brisswalter et al., 2002; Tomporowski, 2003). Como hemos visto anteriormente, la gran mayoría de investigaciones publicadas sobre la relación existente entre el ejercicio físico y la cognición se han relacionado o están en consonancia con la teorías del arousal (p. ej., Yerkes & Dodson, 1908; Kahnemann, 1973; Humphreys & Revelle, 1984; Sanders, 1986; Hockey, Gaillard & Coles, 1986). Sin embargo, existen muchos estudios que no pueden explicarse con las teorías del arousal, lo que demuestra que la interacción ejercicio físico puntual y la cognición no es tan simple.

Podemos afirmar que un rendimiento cognitivo óptimo causado por la realización de esfuerzos físicos se ha relacionado tradicionalmente con un mayor nivel de activación/arousal hasta un punto determinado (Davranche & Audiffren, 2004; McMorris & Graydon, 2000). La existencia de estos beneficios ha sido apoyada por estudios que muestran cambios positivos en los individuos a partir de los primeros 15-20' de tarea (ver revisión Chang et al., 2012). Normalmente, estos beneficios causados por el ejercicio físico puntual producen diferentes cambios fisiológicos (p.ej., temperatura corporal, frecuencia cardiaca, lactato en sangre, concentración de catecolaminas en plasma) a nivel central y periférico (Chmura, Nazard & Kaciuba-Uscilko, 1994; Chmura et al., 1998), que a su vez incrementan el arousal inducido (estado general de activación) que desempeña un papel fundamental para mantener un nivel óptimo durante diferentes tareas comportamentales que van desde tareas de tiempo de reacción simple, tiempo reacción-elección o tareas de memoria entre otros (Véase Lambourne & Tomporowski, 2010).

De acuerdo a las evidencias mostradas, desde una perspectiva comportamental son destacables los estudios que han encontrado relaciones positivas en forma de U invertida (Ask, 1998; Arent & Landers, 2003; Brisswalter et al., 1995; Chmura et al., 1994; Davranche & Audiffren 2004; Delignieres, Brisswalter & Legros, 1994; Kamijo et al., 2004; Levitt & Gutin, 1971; McMorris & Graydon, 1997; Reilly & Smith, 1986; Salmela & Ndoye, 1986; Tenenbaum et al., 1993). Por ejemplo, Arent & Landers (2003) realizaron un estudio examinando una tarea de TR simple mientras pedaleaban en un cicloergómetro. Para ello utilizaron a participantes en edad universitaria (n= 104) que fueron asignados al azar a uno de los ocho niveles de arousal/activación diseñados para esta investigación (entre el 20% y el 90% de la reserva de la FC_{máx}). Los resultados mostraron que el rendimiento óptimo en la tarea de TR simple se observó en el 60-80% del arousal máximo. Estos hallazgos mostraron una tendencia cuadrática y apoyan las predicciones previas de la hipótesis de la U-invertida.

En este mismo contexto, Chmura et al., (1994) reclutaron a 22 jugadores de fútbol. Los jugadores tuvieron que realizar una tarea de TR simple mientras que realizaban un protocolo incremental en cicloergómetro. Mientras realizaban el protocolo se recogieron medidas de lactato, adrenalina y noradrenalina para valorar la intensidad del ejercicio. Los resultados mostraron una correlación negativa entre la concentración de catecolaminas plasmáticas y TR durante un ejercicio incremental hasta el agotamiento. Esta relación de las catecolaminas durante un ejercicio submáximo podría ser responsable de la mejora de los TR a estas intensidades. Los resultados también indicaron que los mejores TRs se encontraron en la intensidad del 75% del $V_{O_{2m\acute{a}x}}$ justamente donde se superaron el umbral de adrenalina y de lactato. Por lo tanto, los resultados mostraron un patrón de U invertida con respecto a todas las medidas.

Moderadores potenciales en la relación entre el ejercicio físico y la cognición

A pesar de la relevancia que ha adquirido la presente línea de investigación en la literatura actual, la gran variabilidad de resultados encontrados genera controversia acerca del estudio de la cognición durante el ejercicio (Mc Morris, Tomporowski & Audiffren, 2009) y sugieren la importancia de explorar potenciales moderadores (Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010). Así, la mayoría de investigaciones que han intentado identificar los factores que pueden condicionar estos diversos resultados y ha concluido diciendo que principalmente la intensidad del ejercicio, el momento en el que se administra la tarea y la duración, el tipo de tarea aplicada y el nivel de condición física de los participantes, serán moderadores determinantes en los resultados que se encuentran en este tipo de investigaciones.

Influencia de la intensidad del ejercicio

Tal y como hemos afirmado anteriormente, el deterioro del rendimiento cognitivo causado por la realización de esfuerzos físicos³, se han intentado justificar en base al arousal o activación provocada por la realización de esfuerzos puntuales, principalmente en base a la teoría de la U invertida (Yerkes & Dodson, 1908). En la literatura, un aumento del arousal inducido por la intensidad del ejercicio por encima del punto/zona de

³ Es importante definir que la intensidad refleja la magnitud del esfuerzo requerido para realizar un ejercicio físico y además, la intensidad de la actividad física varía según la condición física de cada persona.

funcionamiento óptimo, se observaría un perjuicio en el funcionamiento de diferentes procesos cognitivos. Sin embargo, un aumento del “arousal” hasta el punto óptimo, tendría un efecto positivo sobre el funcionamiento cognitivo puesto que conllevaría un aumento en el flujo sanguíneo cerebral y el consiguiente incremento en los niveles de neurotransmisores, catecolaminas y/o endorfinas (ver Brisswalter, Collardeau & Arcelin, 2002, para una revisión), así como en los niveles glucosa, oxígeno o sustratos energéticos (Ide & cols., 2000).

Relacionado con lo mencionado anteriormente, nos encontramos con la teoría de utilización de señales de Easterbrook (Easterbrook, 1959), que sugería que un ejercicio a intensidad moderada (intensidad de ejercicio por debajo del umbral de lactato, es decir $<70\% V_{O2\text{máx}}$) podría mejorar el rendimiento, mientras que el ejercicio de alta intensidad [intensidad de ejercicio por encima del umbral de lactato (duro-muy duro)] conduciría a una disminución en el rendimiento cognitivo. En este mismo sentido, otros estudios con diferentes protocolos incrementales indicaron que la zona óptima para el rendimiento podría variar entre el 40% y el 60% del $V_{O2\text{ máx}}$ (Reilly & Smith 1986). Sin embargo, individuos con un acondicionamiento físico aeróbico alto tendrían mejores rendimientos cognitivos en intensidades algo más altas (Brisswalter, Arcelin & Audiffren, 1997) (Ver tabla 1).

A pesar de la importancia del arousal inducido por el ejercicio físico puntual y su papel relevante en el rendimiento cognitivo, escasas investigaciones realizadas con electroencefalografía (EEG) y potenciales corticales evocados (ERPs en sus siglas en inglés) fueron muy relevantes para el objeto de estudio que ahora nos ocupa. Por un lado, los resultados de Kubitz et al., (1996) mostraron que el ejercicio físico puntual aeróbico aumentó el arousal y se atribuyó a un incremento de la actividad de las ondas cerebrales beta y decremento de la actividad de las ondas cerebrales alfa. Por otro lado, los resultados de Magnié, Bermon & Martin, (2000) y los de Yagi, Coburn & Estes, (1999), sugirieron a partir de los datos obtenidos en el P300 sobre la positiva relación entre el arousal/excitación inducida por el ejercicio y las mejoras específicas en el rendimiento cognitivo.

La hipótesis formulada por Chmura, Kryzstofiak & Ziemba (1998) proporcionó evidencias claras acerca del papel modulador de la intensidad del ejercicio en la cognición. Esta hipótesis plantea que la concentración de adrenalina en el cerebro se

asocia con una mejora de la capacidades cognitivas y sobre la eficacia de procesamiento Clark, Geffen & Geffen, 1989). Al comparar estas evidencias, Chmura & cols., (1994 y 1998) sugerían que el ejercicio podría producir una excitabilidad en la corteza motora y que además, este efecto del ejercicio podría estar mediado por el sistema noradrenérgico. Teniendo en cuenta las ideas expuestas anteriormente, indicaron una correlación negativa entre la concentración de catecolaminas plasmáticas y el rendimiento cognitivo (TR) durante un ejercicio incremental hasta el agotamiento.

Tabla 1. Tabla adaptada del Manual del ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio físico 2010.

Intensidad	Intensidad Relativa		Amplitud de la intensidad absoluta (MET) según los niveles de forma física			
	V _{O₂R} (%)	FC (%)	12 MET	10 MET	8 MET	6 MET
	FCR (%)	Máxima	V _{O₂máx}	V _{O₂máx}	V _{O₂máx}	V _{O₂máx}
Muy ligera	< 20	< 50	< 3.2	< 2.8	< 2.4	< 2.0
Ligera	20 – 39	50 – 63	3.2 – 5.3	2.8 – 4.5	2.4 – 3.7	2.0 – 3.0
Moderada	40 – 59	64 – 76	5.4 – 7.5	4.6 – 6.3	3.8 – 5.1	3.1 – 4.0
Dura	60 – 84	77 – 93	7.6 – 10.2	6.4 – 8.6	5.2 – 6.9	4.1 – 5.2
Muy dura	≥ 85	≥ 94	≥ 10.3	≥ 8.7	≥ 7.0	≥ 5.3
Máxima	100	100	12	10	8	6

MET⁴, Equivalente metabólico (1 MET - 3.5 ml · Kg⁻¹ · min⁻¹); V_{O₂ R}, reserva de consumo de oxígeno; FCR, frecuencia cardiaca de reserva; FC, Frecuencia Cardiaca.

En definitiva, de las evidencias expuestas anteriormente extraemos una idea principal que afirma que la intensidad del ejercicio es un potente moderador que se ha considerado usualmente en los estudios que evalúan los efectos puntuales del ejercicio físico. Vinculada a este razonamiento, juega un papel muy importante la hipótesis de la “U invertida”, ya que esta predice que el ejercicio físico puntual a una intensidad moderada producirá los mayores beneficios cognitivos. Sin embargo, es obvio que si

⁴ MET (metabolic equivalent of task) es la unidad de medida del índice metabólico y corresponde a 3,5 ml O₂/kg·min, que es el consumo mínimo de oxígeno que el organismo necesita para mantener sus constantes vitales. Por ejemplo, cuando una persona realiza carrera continua a 7,5 min/km estaría haciendo un ejercicio con una intensidad de 8 METs. Por lo tanto, esto significaría que está ejerciendo una intensidad 8 veces mayor de lo que haría en reposo.

sumamos a los aspectos tratados anteriormente que el nivel de intensidad del ejercicio físico es importante para determinar la magnitud de los cambios que pueden producir algunos mecanismos fisiológicos [FC, las catecolaminas, y el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF)], podríamos predecir de forma fiable los efectos que podrían tener en el comportamiento.

Momento en el que se administra la tarea cognitiva y duración.

El momento concreto en el que se administra la tarea cognitiva y la duración de la misma son moderadores de interés en este campo de estudio. De hecho, estos moderadores influyen en el efecto del ejercicio puntual sobre el rendimiento cognitivo en todo tipo de poblaciones [niños, adultos jóvenes y mayores (ver meta-análisis de Lambourne & Tomporowski, 2010), para su comprensión]. En este sentido, es preciso decir que existen varios paradigmas para su estudio. Así, por ejemplo conocemos las pruebas cognitivas durante el ejercicio físico, las que se realizan después del ejercicio físico y las pruebas que se realizan antes y después (medidas pre y post tratamiento o intervención). En la presente tesis doctoral nosotros nos centraremos en el paradigma que las analiza durante el ejercicio físico (para más información leer el punto 2.3.2.3. Funciones cognitivas durante el ejercicio físico puntual).

Relacionado con lo anterior, Petruzello, Lander & Hatfield, (1991) afirmaron que el ejercicio físico puntual con una duración de menos de 20' no encontraba facilitación en el rendimiento. En otras palabras, el rendimiento de los participantes disminuía durante los 10' iniciales del ejercicio y en el intervalo posterior de 10'. Sin embargo, el rendimiento sí facilitó cuando las pruebas cognitivas tenían una duración de más de 20' ejercicio. No obstante, cuando la duración del ejercicio físico tenía más de 1 hora de duración, los síntomas de fatiga aparecían y se mostraban de forma evidente. Tomporowsky & Ellis (1987) sugirieron que los individuos bien entrenados podrían compensar los efectos negativos de la fatiga cuando se tienen que realizar tareas cognitivas en condiciones de extrema fatiga. De hecho, esta afirmación encaja con la teoría de asignación de recursos Kahneman (1973). Así, estudios recientes han sugerido el papel de la asignación de recursos como una explicación de una mejora en el rendimiento cognitivo durante el ejercicio (Dietrich & Audiffren, 2011; McMorris & Hale 2012).

Cuando la tarea se llevó a cabo durante o inmediatamente después del ejercicio, se observó una mejora en el rendimiento cognitivo, sobre todo en larga duración (Chmura, Kryzstofiak & Ziemia, 1998; Collardeau, Brisswalter & Audiffren 2001; Collardeau, Brisswalter & Vercruyssen, 2001). Las anteriores investigaciones sugieren que el aumento de la carga metabólica asociada con la larga duración del ejercicio induce un aumento del arousal/excitación que mejoraría el funcionamiento cognitivo. En cualquier caso, en general, los resultados encontrados en la literatura no son esclarecedores (Arcelin et al., 1998; Etnier et al., (1997), por lo que se necesita más investigación al respecto.

Nivel de condición física de los participantes

Otro moderador que juega un rol relevante en las investigaciones que vinculan el ejercicio físico y el rendimiento cognitivo es la condición física de los participantes (Brisswalter, 2002; Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010). Sin embargo, los hallazgos existentes muestran relaciones contradictorias entre el ejercicio físico agudo, el nivel de condición física y el rendimiento cognitivo (Arcelin, 1999; Etnier, Salazar & Landers, 1997). Tradicionalmente, la mayoría de estudios centrados en este importante tópico de investigación han intentado igualar, el nivel de condición física a nivel de las muestras elegidas. Usualmente el nivel de condición se ha expresado como nivel de condición física bajo, moderado o alto. Sin embargo, uno de los problemas metodológicos encontrados en este tipo de investigaciones es el control de la condición física y probablemente ha sido una de las causas más plausibles para explicar la diversidad de resultados encontrados (ver Brisswalter, Collardeau & Arcelin, 2002).

Tradicionalmente cuando se lleva a cabo una evaluación de la aptitud física en ergómetro de cinta rodante (carrera) o en un cicloergómetro (bicicleta), el principal criterio para medir la capacidad física, es a través de la capacidad aeróbica ($\dot{V}O_{2m\acute{a}x}$). (Para más información ver tabla 2 y 3).

Al igual que comentábamos arriba, en el caso de la condición física de los participantes, los resultados no son consistentes. Por ejemplo, Etnier et al., (1997) informaron de un tamaño del efecto de 0,33 para estudios que utilizaron un ejercicio regular y un tamaño del efecto de 0,54 para estudios que combinaron medidas transversales con episodios puntuales de ejercicio físico. Sin embargo, Arcelin (1999) no encontró ninguna diferencia en el tamaño del efecto entre los individuos con buena condición física ($\dot{V}O_{2m\acute{a}x} > 60$ ml O_2 /kg/min) y los individuos con peor condición física ($\dot{V}O_{2m\acute{a}x} < 60$ ml O_2 /kg/min); tamaño del efecto $0,22 \pm 0,20$ vs $0,18 \pm 0,15$, respectivamente.

Tabla 2. Percentiles de potencia aeróbica máxima para hombres. Adaptado del manual ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio (2010).

Percentil	Hombres $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ (ml/kg/min)						
	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	
99	61.2	58.3	57.0	54.3	51.1	49.7	Superior
95	56.2	54.3	52.9	49.7	46.1	42.4	
90	54.0	52.5	51.1	46.8	43.2	39.5	Excelente
85	52.5	50.7	48.5	44.6	41.0	38.1	
80	51.1	47.5	46.8	43.3	39.5	36.0	
75	49.2	47.5	45.4	41.8	38.1	34.4	
70	48.2	46.8	44.2	41.0	36.7	33.0	
65	46.8	45.3	43.9	39.5	35.9	32.3	Bueno
60	45.7	44.4	42.4	38.3	35.0	30.9	
55	45.3	43.9	41.0	38.1	33.9	30.2	
50	43.9	42.4	40.4	36.7	33.1	29.4	Regular
45	43.1	41.4	39.5	36.6	32.3	28.5	
40	42.2	41.0	38.4	35.2	31.4	28.0	
35	41.0	39.5	37.6	33.9	30.6	27.1	
30	40.3	38.5	36.7	33.2	29.4	26.0	Malo
25	39.5	37.6	35.7	32.3	28.7	25.1	
20	38.1	36.7	34.6	31.1	27.4	23.7	
15	36.7	35.2	33.4	29.8	25.9	22.2	
10	35.2	33.8	31.8	28.4	24.1	20.8	
5	32.3	31.1	29.4	25.8	22.1	19.3	Muy malo
1	26.6	26.6	25.1	21.3	18.6	17.9	
	n=2606	n=13158	n=16534	n= 9102	n=2682	n=467	

Tabla 3. Percentiles de potencia aeróbica máxima para mujeres. Adaptado del manual ACSM para la valoración y prescripción del ejercicio (2010).

Percentil	Mujeres $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ (ml/kg/min)						
	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	70-79	
99	55.0	52.5	51.1	45.3	42.4	42.4	Superior
95	50.2	46.9	45.2	39.9	36.9	36.7	
90	47.5	44.7	42.4	38.1	34.6	33.5	Excelente
85	45.3	42.5	40.0	36.7	33.0	32.0	
80	44.0	41.0	38.9	35.2	32.3	30.2	
75	43.4	40.3	38.1	34.1	31.0	29.4	
70	41.1	38.8	36.7	32.9	30.2	28.4	
65	40.6	38.1	35.6	32.3	29.4	27.6	Bueno
60	39.5	36.7	35.1	31.4	29.1	26.6	
55	38.1	36.7	33.8	30.9	28.3	26.0	
50	37.4	35.2	33.3	30.2	27.5	25.1	Regular
45	36.7	34.5	32.3	29.4	26.9	24.6	
40	35.5	33.8	31.6	28.7	26.6	23.8	
35	34.6	32.4	30.9	28.0	25.4	22.9	
30	33.8	32.3	29.7	27.3	24.9	22.2	Malo
25	32.4	30.9	29.4	26.6	24.2	21.9	
20	31.6	29.9	28.0	25.5	23.7	21.2	
15	30.5	28.9	26.7	24.6	22.8	20.8	
10	29.4	27.4	25.6	23.7	21.7	19.3	
5	26.4	25.5	24.1	21.9	20.1	17.9	Muy malo
1	22.6	22.7	20.8	19.3	18.1	16.4	
	n=1350	n=4394	n=4834	n= 3103	n=1088	n=209	

Tipo de tarea cognitiva

La relación existente entre el ejercicio físico puntual y el rendimiento cognitivo también está moderada por el tipo de tarea cognitiva (Chang et al., 2012; Etnier et al., 1997; Lambourne & Tomporowski, 2010). En este sentido, Lambourne & Tomporowski, (2010), informaron que el ejercicio puntual tuvo grandes efectos beneficiosos sobre las habilidades motoras y rendimiento académico. No obstante, este mismo meta-análisis reportó efectos negativos en las tareas relacionadas con el razonamiento y las habilidades verbales. Muchos estudios que analizan los efectos puntuales del ejercicio utilizan tareas de TR (Fleury & Bard, 1987; Hogervorst et al, 1996. McMorris, 1995; McMorris & Keen, 1994; Travlos & Marisi, 1995) y tareas de reconocimiento visual (Bard & Fleury, 1978; Fleury et al, 1981). Recientemente, los investigadores han comenzado a examinar los efectos del ejercicio físico puntual sobre la función ejecutiva (Chang & Etnier, 2009; Dietrich & Sparling, 2004; Sibley et al., 2006 y Tomporowski et al., 2005).

Cuando se examina el tipo de tarea cognitiva para los estudios que exploran el efecto del ejercicio físico puntual sobre el procesamiento de la información o el TR encontramos efectos mixtos. Por ejemplo, Verbugt et al., (2013) sugieren que el ejercicio físico mejora el funcionamiento ejecutivo, mientras que Lambourne & Tomporowski, (2010) han informado efectos negativos para la velocidad de procesamiento (tamaños del efecto no reportados) y Chang et al., (2012) han mostrado efectos positivos (Tarea de TR: tamaño del efecto= 0.08; Tarea de procesamiento de la información: tamaño del efecto= 0.043). Sobre la base de los resultados expuestos se sugiere sobre la importancia de estudiar moderadores adicionales, ya que estos podrían contribuir e influir en la naturaleza de los efectos del ejercicio. De hecho, una limitación de los anteriores meta-análisis es que no tienen suficiente poder estadístico para examinar a dos o más moderadores de forma simultánea. Por lo tanto, podemos sugerir la importancia de explorar otros moderadores adicionales concurrentemente, para así buscar interacciones significativas para la naturaleza de la tarea.

Las afirmaciones anteriores, son particularmente relevantes cuando pensamos en tareas de TR, ya que este tipo de tareas han mostrado que el rendimiento de los participantes se ha visto modulado por la intensidad del ejercicio físico. Concretamente, este puede cambiar a lo largo de la tarea y puede resultar de particular interés para profundizar sobre la comprensión de la naturaleza de la tarea y sobre todo, en el caso de esta tesis doctoral, sobre la comprensión de una tarea de atención sostenida o vigilancia.

Hasta la fecha, ningún estudio ha examinado los efectos del ejercicio puntual sobre el desempeño de una tarea de vigilancia realizada simultáneamente. Los estudios en la literatura existente han utilizado tareas de RT simples o de elección con un objetivo predecible (e.g., Brisswalter et al., 1995; Chmura, Nazar & Kaciuba-Uscilko, 1994; Davranche et al., 2006; Levitt & Gutin, 1971; Martens & Landers, 1970; Reilly & Smith, 1986; Côte et al., 1992) y presentan patrones de RTs completamente diferentes en comparación con las tareas de vigilancia. De hecho, en las tareas de vigilancia, en contraste con las tareas TR simple, el énfasis se consigue con la monotonía de la tarea y la alta incertidumbre temporal del objetivo lo que implica que los participantes mantengan su atención durante un largo periodo de tiempo.

En este contexto, es preciso comentar que la presente tesis doctoral es la primera aproximación empírica al estudio de los efectos concurrentes de ejercicio físico mientras se realiza una tarea de vigilancia. La tarea que principalmente usamos fue una versión modificada de una tarea de vigilancia psicomotora (TVP) y se completó mientras los participantes pedaleaban en un cicloergómetro (consultar método general del capítulo IV para más información). Las demandas de la TVP se sustentan por los estudios de neuroimagen (Drummond et al., 2015) mostrando actividad cerebral típicamente asociada con la red de atención sostenida (véase Lawrence, Ross, Hoffmann, Garavan & Stein, 2003) y de asignación de recursos atencionales (ver Culham, Cavanagh & Kanwisher, 2001).

En definitiva, creemos, sobre la base de esta investigación previa, que las tareas de vigilancia (TVP, SART, etc.) son mucho más que simples tareas de tiempo de reacción o tareas de inhibición, ya que involucran demandas de atención que emplean la vigilancia o atención sostenida (o alerta tónica en términos de la red atencional de Posner ; ver Petersen & Posner, 2012, para una revisión) de la red cerebral que se ha identificado en numerosos estudios de neuroimagen (incluyendo la corteza cingulada media, el córtex prefrontal, la corteza premotora ventral, la unión temporal-parietal, entre otras áreas, Rosenberg & cols, 2016; Langner & Eickhoff, 2012, para una revisión). Las tareas diseñadas específicamente para medir vigilancia o atención sostenida suelen requerir un alto grado de atención para mantener una ejecución óptima, siendo en la mayoría de las ocasiones bastante monótonas (Manly & cols, 2003; Warm & cols, 2008).

Parece bastante sorprendente la falta de investigación sobre el desempeño de la vigilancia durante el ejercicio, al menos en el campo de las ciencias del deporte, dada la importancia de la vigilancia o atención sostenida para mantener un rendimiento óptimo

durante la competición deportiva o durante una sesión de ejercicio. Por esa razón, ahora abordaremos un tema de crucial interés para nosotros como “*la cognición durante el ejercicio*”, aspecto especialmente relevante para la comprensión de la presente tesis doctoral. Cuando hablamos de funciones cognitivas durante el ejercicio físico puntual, es preciso dejar claro que las personas en cuestión tendrán que realizar un trabajo físico con implicaciones fisiológicas y un trabajo cognitivo con una carga mental determinada de forma concurrente.

Desde una perspectiva general, una revisión de Lambourne & Tomporowski, (2010), mostró que la mayoría de estudios que habían realizado de forma concurrente una tarea y un ejercicio físico puntual habían usado diferentes tareas cognitivas tales como tareas de TR simple (Ando & cols., 2005; Bender & McClynn, 1976; Brisswalter et al., 1995; Collardeau, Brisswalter & Audiffren, 2001; Reilly & Smit, 1986; Sjoberg, 1977), tareas de tiempo de reacción de elección (Audiffren et al., 2008; Kruk et al., 2001; McMorris et al., 2003; McMorris et al., 2005; McMorris et al., 2008; Serwah & Marino, 2006), tareas de búsqueda visual (McMorris & Graydon, 1997), tareas de discriminación visual (McGlynn et al., 1977; McGlynn et al., 1979) y tareas de control (Pesce et al., 2003; Pontifex & Hillman, 2007; Yagi et al., 1999). A modo de conclusión, esta revisión afirmó que el rendimiento cognitivo se había visto modulado por la intensidad del ejercicio físico. Concretamente, el ejercicio físico puntual a intensidades moderadas beneficiará el rendimiento cognitivo mejorando la exactitud de respuesta y acelerando los TRs en tareas simples y de discriminación. Sin embargo, al aumentar la intensidad del ejercicio, esos beneficios encontrados se convierten en perjuicios (deterioro atencional) sobre todo en las tareas más demandantes (ver para una revisión, Brisswalter, Collardeau & Arcelin, 2002; Chang et al., 2012; Etnier et al., 1997; Lambourne & Tomporowski, 2010; Tomporowski, 2003).

En este mismo contexto, el deterioro atencional se podría vincular a la conocida hipótesis de la hipofrontalidad transitoria de Dietrich & Audiffren (Dietrich & Audiffren, 2011). Como ya explicamos anteriormente, se provocará que haya un déficit de recursos metabólicos disponibles para otras regiones cerebrales encargadas del procesamiento cognitivo, induciendo a su vez una disminución en el rendimiento de ciertas funciones ejecutivas (Dietrich, 2003, 2006). A pesar de la relevancia que ha adquirido la presente línea de investigación en la literatura actual, la gran variabilidad de resultados encontrados genera controversia acerca del estudio de la cognición durante el ejercicio (Mc Morris, Tomporowski & Audiffren, 2009) y sugiere la importancia de explorar

potenciales moderadores que afecten al rendimiento. (Lambourne & Tomporowski, 2010) (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Esquema descriptivo de los estudios que se han realizado acerca de los efectos puntuales sobre las funciones cognitivas durante el ejercicio. Extraído de Lambourne & Tomporowski, 2010).

Autor o autores	N	Diseño	Sexo	Tipo de ejercicio	Duración del ejercicio	Demanda del ejercicio	Efectos	Tareas	Rango del TE
Ando et al., 2005 ^a	9	C ^b	H	Bicicleta	21 min	Fatiga	9	TR	-0.53 to 0.30
Audiffren et al., 2008 ^a	17	C	M	Bicicleta	40 min	Estado estable	5	CRT	0.10 to 0.30
Bender and McGlynn, 1976 ^a	10	NC	H	Carrera	12 min	U-invertida	12	TR	-2.80 to -1.10
Brisswalter et al., 1995	10	NC	H	Bicicleta	~57 min ^c	U-invertida	6	TR	-2.32 to -0.32
Collardeau et al., 2001a,b ^a	11	NC	NR	Carrera	90 min	Fatiga	5	TR	-0.45 to 0.60
Collardeau et al., 2001a,b ^a	8	NC	NR	Carrera	100 min	Fatiga	2	TR, CRT	-0.58 to -0.46
Kruk et al., 2001	9	NC	H	Bicicleta	HA	Fatiga	6	CRT	-1.89 to 0.27
McMorris and Graydon, 1997	12	NC	H	Bicicleta	NR	U-invertida	10	BV	-0.29 to 0.84
McMorris et al., 2003	9	NC	H	Bicicleta	NR	U-invertida	4	CRT	0.16 to 0.76
McMorris et al., 2005	9	NC	H	Bicicleta	NR	U-invertida	8	CRT	-0.15 to 0.80
McMorris et al., 2008	12	NC	H	Bicicleta	6 min	U-invertida	8	CRT, RNG	-0.46 to 0.52
McGlynn et al., 1977 ^a	14	NC	H	Carrera	12 min	U-invertida	8	Line matching	-0.64 to 0.57
McGlynn et al., 1979 ^a	15	NC	FE	Carrera	12 min	U-invertida	8	Line matching	-0.34 to 0.16
Pesce et al., 2003	16	NC	MI	Bicicleta	NR	Estado estable	2	Atención	-0.91 to 1.43
Pontifex and Hillman, 2007	41	C	MI	Bicicleta	~12 min	Estado estable	1	Tarea de flancos	-0.81
Reilly and Smith, 1986	10	NC	H	Bicicleta	NR	U-invertida	5	Pursuit rotor	-0.98 to 0.44
Serwah and Marino, 2006	8	NC	H	Bicicleta	~90 min	Fatigue	3	CRT	0.66 to 0.96
Sjoberg, 1977 ^a	25	NC	H	Bicicleta	~52 min	U-invertida	15	RT, CRT	-1.32 to 1.00
Vercruyssen et al., 1989 ^a	11	NC	H	Bicicleta	NR	Estado estable	1	ET	0.73
Yagi et al., 1999a	24	NC	MI	Bicicleta	10 min	U-invertida	2	Oddball	0.15 to 0.49
Ziembra et al., 1999	15	NC	H	Bicicleta	HA	Fatiga	6	CRT	-0.55 to 0.63

C, controlado; NC, no controlado; H, hombres; FE, mujeres; MI, mixto; NR, no reportado; HA, hasta agotamiento; TR, tiempo de reacción; CRT, tiempo de reacción-elección. ET, estimación temporal; BV, búsqueda visual; TE, tamaño del efecto.
^a Estudios incluidos en ambos análisis.
^b Tres efectos de este estudio no estaban controlados y fueron calculados usando d de Cohen (Cohen, 1988).
^c Sin incluir los periodos de descansos.

En resumen, a lo largo de esta sección hemos pretendido abordar los efectos del ejercicio físico puntual en el funcionamiento cognitivo. La literatura ha mostrado el ejercicio físico puntual a intensidades moderadas podría mejorar el rendimiento. Los

fundamentos de esta observación son los cambios fisiológicos, es decir los cambios de actividad que se describen como incrementos del arousal/activación. Aquí, hemos descrito los moderadores principales que influyen en la relación entre el ejercicio físico y la cognición. Aunque hemos explorado todos, es cierto que destacamos los que tienen que ver con el tipo de tarea cognitiva, ya que hasta la actualidad, no conocemos ninguna investigación que hay estudiado los efectos del ejercicio físico puntual sobre el desempeño de una tarea de vigilancia realizada de forma concurrente. En este contexto, también hemos hecho hincapié, ya que tras abordar los moderadores potenciales en nuestro tópico de estudio, nos hemos centrado las funciones cognitivas durante el ejercicio físico puntual. Más investigación sería necesaria para la identificación de factores funcionales en relación con el rendimiento cognitivo óptimo durante el ejercicio y podríamos encontrar mejoras a través del entrenamiento.

A continuación, haremos frente a la relación existente entre la vigilancia o atención sostenida (función cognitiva clave para nosotros en esta tesis doctoral) y el ejercicio físico puntual. En este sentido, intentaremos esclarecer un poco más el concepto de vigilancia o atención sostenida y su vinculación con el ejercicio físico.

2.2.4. La vigilancia o atención sostenida como función cognitiva clave en la relación entre ejercicio físico puntual y la cognición.

Como se ha podido ver anteriormente, en la literatura se ha evidenciado que el ejercicio físico tiene efectos beneficiosos sobre una gran diversidad de tareas implicando diferentes funciones cognitivas de alto nivel (McMorris, Tomporowski & Audiffren, 2009; Tomporowski, 2003). Sin embargo, dentro del gran avance que se ha encontrado en las últimas dos décadas, tenemos conocimiento parcial acerca de un proceso cognitivo inherente en la gran mayoría de estas tareas cognitivas y que además resulta necesario para un óptimo rendimiento, i.e., atención sostenida o vigilancia.

Cuando hablamos de vigilancia o atención sostenida, nos referimos a la función cognitiva (atencional) que se encarga de facilitar la respuesta eficaz (rápida y precisa) ante estímulos relevantes así como de la asignación de recursos atencionales a lo largo del desarrollo de la tarea, manteniendo las metas del observador. Esta función cognitiva representa un componente fundamental de las capacidades cognitivas generales en humanos, ya que una capacidad reducida de monitorizar fuentes de información

significativas afecta directamente a todas las capacidades cognitivas (Sarter, Givens & Bruno, 2001).

En este sentido, debemos destacar que la vigilancia o atención sostenida es una función cognitiva de alto nivel necesaria en la mayoría de las tareas de laboratorio (ver Oken, Salinsky & Elsas, 2006 para una revisión), tareas de la vida diaria [e.g., conducción (Correa, Molina & Sanabria, 2011) o estudiantes (Steinmayr, Ziegler & Träuble, 2009) y entornos de trabajo [e.g. control de la salud (Weinger & Englund, 1990), conducción profesional (Dorrian, Roach, Fletcher & Dawson, 2007; Wiggins, 2011), inspección y detección (Hancock & Hart, 2002) entre otros], que además influye en el funcionamiento de otros mecanismos atencionales de alto nivel (e.g., el control cognitivo; Langner & Eickhoff, 2013).

Algunas de las características propias en las que se enfatiza cuando se habla de tareas de atención sostenida o vigilancia son la alta incertidumbre espacial/temporal del objetivo, lo que requiere que los participantes mantengan su atención enfocada en la tarea continuamente y que reorienten su atención hacia los objetivos de la tarea en caso de aburrimiento mental o distracciones. En este sentido, también cargan la atención sostenida aspectos como la carga de memoria de trabajo, la tasa de estímulos, así como el tiempo en tarea. Este último es un factor determinante en el rendimiento en las tareas de vigilancia o atención sostenida, ya que lo que se suele encontrar es que con el paso del tiempo ejecutando una tarea la ejecución disminuye, lo que se ha denominado “decremento en vigilancia”. Este efecto se ha relacionado con un agotamiento continuo de los recursos atencionales (Warm et al., 2008). Otro aspecto a tener en cuenta en este tipo de tareas es que dependen del estado de atención general del participante, que principalmente pueden estar influenciado por varios factores tales como privación de sueño (por ejemplo, Basner & Dinges, 2011), los ritmos circadianos (por ejemplo, Correa, Molina & Sanabria, 2013, Muto et al., 2016) o la aptitud cardiovascular (e.g., Luque-Casado y cols., 2016a, 2016b).

Debemos destacar el papel fundamental de la vigilancia durante las tareas que realizamos en nuestro día a día y la importancia que tiene su rendimiento en diferentes actividades como el deporte y entornos de trabajo. Un estado de vigilancia óptimo minimizará los errores humanos (e.g., Caldwell, Caldwell, Brown & Smith, 2004) y evitará muchas circunstancias peligrosas en nuestra vida diaria.

Ejercicio físico puntual y vigilancia

Durante una competición de ciclismo de carretera, un ciclista que se encuentra subiendo un puerto de montaña, es atacado por un rival de forma inesperada. La reacción del ciclista será la de levantarse del sillín y responder a este ataque para mantenerse con posibilidades en carrera. En este mismo sentido, la aparición repentina de un bache o un obstáculo durante el circuito de una maratón requerirá de una respuesta rápida para evitar el obstáculo inesperado. Estos dos ejemplos muestran la gran importancia de mantener un nivel óptimo de vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio de larga duración con el fin de mantener el rendimiento lo mejor posible. Por lo tanto, un nivel adecuado de atención sostenida desempeña un papel fundamental en el deporte.

Tradicionalmente la investigación realizada con EEG ha señalado que el ejercicio aeróbico realizado a una intensidad moderada mejora las frecuencias altas del espectro de EEG, principalmente en la banda de frecuencia alfa, que se ha relacionado con la relajación y un estado de bienestar/serenidad (Lattari et al., 2014). En este sentido, Kubitz & Pothakos (1997), encontraron cambios en la activación cerebral durante ejercicio aeróbico (10 minutos en cicloergómetro), disminuyendo la frecuencia alfa y aumentando la frecuencia beta. Otras investigaciones coinciden con los aumentos en las frecuencias bajas, especialmente en la potencia theta (Ballard, 1996; Paus et al., 1997; Pennekamp et al., 1994). En un estudio similar, Smith, Eling, Hopman & Coenen (2005), midieron los efectos de un esfuerzo mental y un esfuerzo físico presentados consecutivamente sobre el EEG. En su estudio evaluaron a 3 grupos diferentes. El grupo 1 y 2 completaron un esfuerzo físico de 40 minutos en cicloergómetro y una tarea mental de 40 minutos, contrabalanceando el orden de presentación. El grupo 3 (grupo control) pasó el mismo tiempo que los otros dos grupos hablando con el experimentador y leyendo revistas. El esfuerzo mental aumentó la frecuencia Theta, (véase también Smith et al., 2004) y en medidas subjetivas disminuyó el estado de alerta-activación, sugiriendo una disminución de la vigilancia o atención sostenida. Sin embargo, el esfuerzo físico aumentó la frecuencia alfa y la frecuencia beta 1 (13-22 Hz), considerándolo como un aumento de vigilancia o atención sostenida. Aunque tras el ejercicio se sentían más cansados, se encontraron aumentos de alerta-activación (medidas subjetivas) lo que sugiere que el esfuerzo físico generó un incremento en la activación global. También se tomaron medidas subjetivas de demanda mental (NASA-TLX) mostrando que no hubo diferencias significativas en la carga percibida entre la tarea mental y la tarea física. Finalizaron diciendo que el esfuerzo mental disminuyó la vigilancia o atención sostenida, mientras

que el esfuerzo físico la aumentó. Los escasos estudios citados anteriormente investigaron el efecto del ejercicio sobre el estado de vigilancia durante el ejercicio tomando medidas de EEG. Sin embargo, que sepamos, en la actualidad no encontramos ninguna investigación que haya examinado el efecto de un ejercicio físico puntual mantenido sobre la ejecución concurrente de una tarea de atención sostenida.

Por un lado, los resultados de los pocos estudios que existían hasta la fecha mostraban principalmente que el ejercicio aeróbico realizado a una intensidad moderada mejora las frecuencias altas del espectro de EEG, generalmente la onda alfa. Sin embargo, el único meta-análisis realizado hasta la fecha (Crabbe & Dishman, 2004), no informó de una influencia específica en la dinámica del cerebro, si no que más bien sugirió la existencia de un aumento general en la potencia de todas las frecuencias (Bailey, 2008). Así, el objetivo del estudio de Bailey fue el de investigar durante una sola sesión de ejercicio aeróbico la actividad del EEG mientras que los participantes realizaban una tarea cognitiva como punto de partida para comprender la dinámica del cerebro. Los resultados de este estudio sugirieron que la actividad EEG aumentó durante el ejercicio y que pudo estar relacionada con la intensidad del ejercicio, lo cual podría influir positivamente en las funciones cerebrales y la cognición.

Tal y como afirmamos anteriormente, resulta extraño la escasa evidencia científica encontrada sobre vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio físico. A pesar de que los pocos estudios encontrados con EEG apuntan hacia una importante relación entre el ejercicio físico a intensidad moderada y mejoras en las frecuencias altas del espectro de EEG y aunque esto podría sugerirnos aumentos en la vigilancia o atención sostenida, existe cierta controversia a la hora de interpretar sus resultados. Además, el estudio de la actividad cerebral en movimiento (durante el ejercicio físico) implica varios problemas metodológicos y técnicos (e.g. movimiento de los electrodos, potenciales musculares, sudoración causada por el ejercicio, etc.). En consecuencia, la mayoría de las investigaciones que buscan relaciones existentes entre ejercicio físico puntual y el funcionamiento cognitivo (actividad cerebral) se han registrado posteriormente a la realización del ejercicio puntual. En definitiva, los datos que encontramos en la literatura son aún insuficientes y por lo tanto, existen diversas cuestiones por esclarecer en el futuro.

Como bien hemos comentado anteriormente, la presente tesis doctoral se plantea con el objetivo principal de clarificar el conocimiento del ejercicio físico sobre el funcionamiento cognitivo. En base a nuestro principal objeto de estudio, la presente tesis doctoral se centrará, en el caso de los primeros 4 Experimentos, en los efectos del ejercicio

físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo, concretamente sobre la vigilancia o atención sostenida y la percepción. Y en el caso del Experimento 5, en los efectos de un programa de ejercicio físico regular sobre la vigilancia o atención sostenida y el control inhibitorio.

Esta primera parte de la introducción, hemos descrito los aspectos más relevantes sobre la literatura referente a la relación entre la cognición y el ejercicio físico puntual. Pasamos ahora a describir nuestro objetivo secundario de investigación que es el de analizar los efectos del ejercicio físico regular en el funcionamiento cognitivo.

2.3. Ejercicio físico regular y la cognición

La práctica de ejercicio físico de forma regular se ha relacionado con beneficios a nivel físico y cognitivo. Son numerosas las investigaciones han manifestado el creciente interés entre el ejercicio físico y el funcionamiento cognitivo y señalado la enorme repercusión que posee esta relación sobre la salud. En este sentido, la práctica de ejercicio se relaciona con cambios a nivel musculo-esquelético, cardiovascular y de funcionamiento (y estructura) del sistema nervioso (autónomo y central). En consecuencia, este enorme interés ha ido creciendo en los últimos años, motivado en gran parte por los importantes hallazgos encontrados en este campo (Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Tomporowski, Lambourne & Okumura, 2011).

En este tema de investigación los estudios investigan los efectos que la práctica regular de ejercicio físico regular produce sobre el rendimiento cognitivo (Van Praag et al., 1999) y sobre diferentes estructuras y funciones cerebrales (Colcombe & Kramer, 2003; Erickson et al., 2011). Los cambios comportamentales y psicológicos inducidos por la práctica regular de un ejercicio físico suelen aparecer unas pocas semanas después del comienzo de la intervención de ejercicio físico realizada de forma regular y pueden mantenerse varias semanas después de su terminación.

Como bien hemos comentado anteriormente, la presente tesis doctoral se plantea con el objetivo principal de clarificar el conocimiento del ejercicio físico sobre el funcionamiento cognitivo. Así, en esta segunda parte de la introducción nos centraremos en nuestro objetivo secundario de estudio “el ejercicio físico regular y la cognición”. En este sentido, destacamos que esta parte nos ayudará a entender los efectos del ejercicio regular en el funcionamiento atencional, algo que nos ayudará a justificar nuestro

Experimento 5 (capítulo VII) que estudia los efectos de un programa de ejercicio físico regular sobre la vigilancia y el control inhibitorio.

Al igual que hicimos en el apartado anterior en el que hacíamos referencia al “ejercicio físico puntual y cognición”, ahora realizaremos una breve revisión de los cambios fisiológicos que se producen por la realización de un esfuerzo físico regular, así como sus efectos sobre el sistema cognitivo. En esta ocasión, es preciso recordar que la realización de un ejercicio físico puntual realizado de forma asidua y repetitiva provocará alteraciones sobre la mayoría de los sistemas y órganos de la persona, pero en esta oportunidad serán alteraciones perdurables y duraderas. Como bien dijimos en el anterior apartado, debemos entender en primer lugar los factores fisiológicos inducidos por el ejercicio físico regular para así comprender mejor la relación existente entre el ejercicio físico regular y el funcionamiento cognitivo.

2.3.1. Cambios fisiológicos inducidos por la realización del ejercicio físico regular.

El ejercicio físico realizado de forma regular produce una serie de adaptaciones fisiológicas en el cuerpo que son perdurables; esto se conoce como efectos regulares al ejercicio (Wilmore & Costill, 2007). Así, el organismo se adapta y acaba produciendo diferentes cambios antropométricos y fisiológicos, produciéndose así un aumento en el nivel funcional del individuo, es decir, mejora nuestra capacidad y nuestra eficacia en el ejercicio.

La adaptación de los órganos y tejidos a estímulos físicos internos se produce de forma heterogénea. A largo plazo, la adaptación se produce como consecuencia de la repetición de estímulos largos o cortos que dejan a los órganos y tejidos en el estado de predisposición para determinados estímulos. La adaptación inmediata se produce por las reacciones que se ocasionan en el organismo ante cualquier esfuerzo, dependiendo del tipo de estímulo y de las reservas funcionales (acúmulo de adaptaciones crónicas adquiridas por el entrenamiento). Esta primera fase se caracteriza por la activación de los sistemas funcionales con un aumento de la frecuencia cardiaca, débito ventilatorio, consumo de oxígeno y aumento de ácido láctico, etc. A esta fase le sigue otra de estabilización de los sistemas funcionales y por último se produce un desequilibrio entre las necesidades y el aporte, entrando en estado de fatiga que precisa más o menos tiempo de recuperación para normalizarse.

Los efectos del ejercicio físico regular dependen del tipo de actividad o ejercicio que se realiza, de la duración del mismo, de la frecuencia con la que se realice y de la intensidad a la que se ejecute.

Cambios fisiológicos producidos sobre el sistema cardiovascular

Mientras realizamos ejercicio físico regular se producen un aumento de las demandas de oxígeno y nutrientes por los músculos. El aparato cardiovascular necesitará un incremento del suministro sanguíneo para suplir estas necesidades a través del incremento del gasto cardiaco (Ver tabla 5)

Tabla 5. Cambios fisiológicos relevantes inducidos por el ejercicio físico regular.

Cambio fisiológico	Consecuencia
Hipertrofia cardiaca	Aumento de la cavidad ventricular
	Incremento del tono parasimpático
Descenso de la frecuencia cardiaca	Descenso del Tono simpático
	Disminución de las estimulación nódulo sinusal
Aumento del volumen sistólico	Hipertrofia cardiaca
	Aumento de la contractilidad del miocardio
Aumento de la capilaridad	Tamaño de la fibra muscular
	Número de mitocondrias
Incremento del volumen sanguíneo	Aumento del número y tamaño de los vasos sanguíneos en los músculos, y la extracción de más oxígeno.

Cambios fisiológicos producidos sobre el sistema respiratorio

Las adaptaciones al ejercicio a nivel respiratorio tienen como objetivo sostener la actividad metabólica a nivel celular. De hecho, el entrenamiento produce adaptaciones celulares como el aumento del tamaño y número de mitocondria y por lo tanto de enzimas oxidativos que demandará una provisión creciente de oxígeno en trabajos físicos sostenidos. Así, algunos de los cambios más relevantes en este punto que nos ocupa son los siguientes;

- Los ajustes del sistema respiratorio que se producen durante la realización del esfuerzo, una vez que el esfuerzo cesa, vuelven a su estado de reposo.

- La frecuencia respiratoria en reposo es de 12 a 20 respiraciones por minuto (rpm) pero durante el ejercicio intenso puede alcanzar 35-45 rpm. llegando hasta 60-70 rpm. en deportistas de alto nivel.
- Ante esfuerzos y entrenamientos sostenidos con frecuencia en el tiempo, a medio y largo plazo, el organismo se adapta produciendo cambios anatómicos y fisiológicos, provocando un aumento en el nivel funcional.
- Durante el ejercicio leve o moderado el volumen espirado (VE) aumenta en forma lineal con respecto al consumo de O₂ (VO₂) y a la producción de CO₂ (VC_{O2}).
- En estos casos el cociente VE/VO es igual a 20 - 25. El aumento de la ventilación surge por la necesidad de eliminar el CO₂ producido para lo cual el incremento será mayor en el volumen corriente que en la frecuencia respiratoria.
- El organismo puede rendir más ante esfuerzos de media y larga duración.
- Las adaptaciones más importantes son el aumento de la superficie respiratoria y la ampliación de la red capilar pulmonar y la mejora de la capacidad difusora alveolo-capilar.
- La eficiencia de los pulmones es mayor, la frecuencia respiratoria disminuye y la capacidad pulmonar aumenta.
- El VO_{2máx} aumenta en un 15 a 30 % en los primeros 3 meses de entrenamiento intensivo y se puede llegar a un incremento del 50 % en un periodo de 2 años.

Otros cambios fisiológicos producidos por el ejercicio físico regular

Por otra parte, existen determinadas respuestas del organismo a la realización de un esfuerzo físico (Willmore & Costill, 2007).

- Aumenta el tamaño de las fibras musculares (hipertrofia).
- Los músculos están fuertes y tonificados.
- La tolerancia muscular aumenta.
- Ayuda a la prevención de la pérdida de flexibilidad a través de los años.
- Los ligamentos y tendones aumentan de grosor y se fortalecen.
- Promueve los depósitos de calcio y otros minerales en el hueso (evitando la osteoporosis o pérdida de masa ósea).
- Se reduce la grasa del cuerpo y aumenta el peso sin grasa (músculos, huesos y órganos).
- Mejora la postura y previene los dolores en la espalda baja.
- Aumenta la excreción de las sustancias perjudiciales.

- Ayuda a la digestión,
- Facilita la relajación y el sueño.
- Etc.

En general, se ha demostrado que el ejercicio físico aeróbico practicado de manera regular produce cambios tanto a nivel cerebral, estructural como funcional (Hillman, Erickson & Kramer, 2008). Para explicar los cambios producidos por el ejercicio físico regular, la hipótesis con más relevancia dentro de la literatura científica es la “hipótesis cardiovascular”. Por un lado, se cree sugiere que en base a esta hipótesis, los beneficios que se encuentran en las funciones cognitivas y que usualmente son asociados a la práctica regular de ejercicio físico están moderados por la mejora de la condición física (Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Colcombe, 2004; Colcombe, 2006). Por otro lado, las adaptaciones fisiológicas a nivel cardiovascular que se asocian al ejercicio físico realizado de forma regular, también se han asociado con adaptaciones a nivel cerebral, que se han relacionado con mejoras sobre el rendimiento cognitivo (Colcombe, 2006; Acevedo & Ekekakis, 2006).

2.3.2. Efectos del ejercicio físico regular en el funcionamiento cognitivo.

El estudio de los efectos del ejercicio físico regular sobre el funcionamiento cognitivo se ha incrementado notablemente en los últimos años, motivado en gran medida por los hallazgos de la neurociencia cognitiva (Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Tomporowski, Lambourne & Okumura, 2011).

Una amplia cantidad de investigaciones han señalado la repercusión positiva que tiene la práctica de actividad física de manera regular sobre la condición física (Kenney, Wilmore & Costill, 2013) y a su vez la repercusión que tiene esta sobre la salud general del individuo (ver Etnier et al., 1997 para una revisión). Partiendo de la consideración anterior, se ha vinculado a la condición física como uno de los moderadores entre el efecto del ejercicio físico y la función cognitiva (ver Colcombe & Kramer 2003, para una revisión). De hecho, está ampliamente demostrado que la realización de un ejercicio físico regular a intensidades aeróbicas moderadas (del 40% al 80% del consumo máximo de oxígeno [$VO_{2m\acute{a}x}$]) actúa positivamente sobre diferentes aspectos de las salud general y mental, además de sobre otras funciones cognitivas tales como la velocidad de respuesta, memoria a corto plazo, motivación, etc. (ver revisiones de Etnier et al., 2006; Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Lambourne & Tomporowski, 2010, para más información).

La amplia mayoría de estudios que se han desarrollado en este ámbito han investigado el efecto del ejercicio físico regular sobre las funciones ejecutivas (Best, 2010; Chaddock et al., 2012; Tomporowski et al., 2011). En menor medida, en tareas que implican memoria a corto plazo (Chaddock et al., 2010, 2011), atención (Trudeau & Shephard, 2008) o procesamiento del lenguaje (Scudder et al., 2014).

A continuación realizamos un breve repaso de la literatura sobre la asociación entre el ejercicio físico realizado de forma regular, estado de forma física y rendimiento cognitivo (Guiney & Machado, 2013). Las investigaciones actuales han demostrado que el ejercicio físico realizado de forma regular favorece que se produzcan diferentes cambios permanentes a nivel estructural tales como la angiogénesis o neurogénesis en diferentes áreas del cerebro (sobre todo en el hipocampo; Erickson, Gildengers & Butters, 2013; Pereira et al., 2007). De igual manera, el ejercicio físico regular genera el incremento de vasos sanguíneos en el hipocampo, el córtex y el cerebelo, lo que incrementa el suministro de nutrientes y energía en estas áreas neurales (ver Cotman et al., 2007, para una revisión).

En términos generales, la relación entre el ejercicio físico regular y el funcionamiento cognitivo está bien documentada (ver Colcombe & Kramer, 2003, para una revisión) y además este importante tema de investigación muestra la existencia de una relación positiva entre ejercicio físico y rendimiento cognitivo. Si bien la investigación realizada en la última década ha supuesto un avance importante en este campo, sigue habiendo aspectos cruciales que requieren investigación.

A continuación, haremos frente a la relación existente entre la vigilancia o atención sostenida (función cognitiva clave para nosotros en esta tesis doctoral) y el ejercicio físico. En este sentido, intentaremos esclarecer un poco más el concepto de vigilancia o atención sostenida y su vinculación con el ejercicio físico.

Las adaptaciones causadas por el ejercicio físico realizado de forma regular están fundamentada generalmente en el aumento de las estructuras cerebrales por la plasticidad cerebral (plasticidad neuronal, aumento de la vascularización y neurogénesis). Las evidencias apuntan a que todas estas adaptaciones producen una mejor respuesta cognitiva en diversas tareas (memoria, atención, velocidad de procesamiento, flexibilidad cognitiva, inhibición, etc). Los participantes que realizan ejercicio físico a intensidad moderada (del 40% al 80% del $VO_{2máx}$) presentan mejores resultados en tareas cognitivas como velocidad de procesamiento, atención selectiva y memoria a corto plazo (Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Tomporowski, Lambourne & Okumura, 2011).

En relación a los argumentos que utilizábamos anteriormente sobre la modulación que ejerce el ejercicio físico sobre las funciones cognitivas, es necesario recordar que principalmente las adaptaciones fisiológicas a nivel cardiovascular que repercuten en una buena condición física explican la asociación entre estas variables partiendo la premisa de la “hipótesis cardiovascular”⁵. Así, los individuos que poseen una buena capacidad cardiovascular rinden mejor en diversas tareas cognitivas en comparación con los individuos con baja capacidad cardiovascular. Significativamente, las evidencias anteriores han sido halladas en diferentes grupos de edad, aunque sobre todo en poblaciones de adultos mayores y en edades tempranas.

En ese contexto y de acuerdo con esta hipótesis, son relevantes los estudios que muestran que el ejercicio físico aeróbico regular parece ser un buen estímulo para el desencadenamiento de cambios estructurales a nivel neural (Hillman, Erickson & Kramer, 2008; Thomas et al., 2012), que en consecuencia, parecen repercutir de manera positiva sobre el rendimiento cognitivo (McMorris, Tomporowski & Audiffren 2009, Acevedo & Ekkekakis, 2006). Dentro de este marco, también son destacables las nuevas investigaciones encontradas que hicieron uso de técnicas de resonancia magnética. (Colcombe, 2004; 2006; Chaddock et al., 2010; Erickson et al., 2011; Pereira et al., 2007) y que se han vinculado con adaptaciones a nivel cerebral, que parecen repercutir sobre el rendimiento cognitivo de forma positiva.

La relación existente entre la práctica crónica de ejercicio físico y/o el nivel de condición física y el funcionamiento cognitivo general, cabe destacar que prácticamente la totalidad de la literatura explica la asociación entre estas variables partiendo de la premisa de la hipótesis cardiovascular. En este sentido, se establece que el ejercicio crónico conduce al mantenimiento y la proliferación neuronal en diferentes áreas cerebrales (especialmente hipocampo) y causa el crecimiento de nuevos capilares sanguíneos [mediante la actuación de FNDF (factor neurotrófico derivado del cerebro) e IGF-1 (crecimiento insulínico tipo 1 o somatomedina)] en hipocampo, córtex y cerebelo, lo que en consecuencia ha demostrado tener repercusiones a nivel de función cognitiva (Voss et al., 1985). Ambas proteínas han presentado un incremento permanente de su

⁵ De acuerdo con esta hipótesis, los beneficios en la función cognitiva que se asocian al ejercicio regular están mediados por la mejora de la condición física. Además, las adaptaciones fisiológicas que se atribuyen a la práctica regular de ejercicio físico, también se han vinculado con adaptaciones a nivel cerebral, que parecen repercutir de manera positiva sobre el rendimiento cognitivo.

producción con intervenciones duraderas de ejercicio físico regular (Cotman, Berchtold & Christie, 2007; Ferris, Williams & Shen, 2007) y podrían resultar determinantes como factores preventivos de degeneración cerebral, potenciadores a largo plazo y para el desarrollo y protección de nuevas neuronas.

2.3.4. La vigilancia como función cognitiva clave en la relación entre el ejercicio físico regular y la cognición.

Hasta donde llega nuestro conocimiento, existen números evidencias científicas que han mostrado los efectos beneficiosos del ejercicio físico regular (aeróbico) sobre una abundante variedad de tareas implicando diferentes procesos cognitivos de alto nivel, tales como atención, control cognitivo, memoria, percepción, entre otros. (Smith, 2010). En los últimos años ha crecido el interés investigativo en el conocimiento de la relación existente entre la práctica regular del ejercicio físico y el rendimiento cognitivo (Guiney & Machado, 2013). Sin embargo, existen numerosos aspectos que no han recibido suficiente atención en la literatura dentro de este ámbito, como, por ejemplo, la vigilancia o atención sostenida. Nótese la importancia que posee este mecanismo cognitivo en todas las áreas de nuestra vida incluyendo el deporte. Sin embargo, a pesar de la importancia que posee la vigilancia o atención sostenida, no existen demasiados estudios que hayan manifestado interés por investigar la interacción existente entre el ejercicio y/o condición física y esta función cognitiva.

Como hemos comentado previamente, la vigilancia o atención sostenida es una función cognitiva clave para el correcto desempeño de la mayoría de tareas que se presentan en nuestra vida diaria e influye en el funcionamiento de otros mecanismos atencionales de alto nivel. La vigilancia determina la predeterminación para responder a estímulos relevantes y la capacidad para asignar los recursos atencionales de manera eficientes con el transcurso del tiempo. Sin embargo, contrariamente a la relevancia que tiene la vigilancia en diferentes campos de estudios, no existen demasiadas evidencias científicas que hayan abordado las relaciones existentes entre el ejercicio físico y esta función cognitiva.

El capítulo VI de la presente tesis doctoral aborda el estudio de un experimento exploratorio en el que se analizan los efectos de un programa de entrenamiento físico (ejercicio físico regular) de diez semanas de duración sobre las características antropométricas (peso e IMC), los parámetros fisiológicos (UVA, potencia máxima y potencia relativa) y sobre dos tareas atencionales: 1) SART y 2) TTRS. Por esta razón,

estamos interesados en los experimentos que muestren intervenciones de entrenamiento en las que se puedan ver posibles vinculaciones causa-efecto. Sin embargo, hasta el momento no hemos encontrado ninguna y por ello hemos abordado este experimento de forma exploratoria. Relevantes también son los resultados de los experimentos que han aplicado un programa de intervención física regular (Hilman et al., 2014; Kamijo et al., 2011; Lakes & Hoyt, 2004; Predovan et al., (2012) y que han encontrado una relación positiva entre el nivel de forma física adquirido con la intervención y el rendimiento cognitivo.

De forma general, la literatura científica encontrada hasta el momento, ha indicado que la aptitud aeróbica y la atención sostenida están positivamente relacionadas (Bunce, 2001; Hillman et al., 2006; Pontifex et al., 2010). De las pocas evidencias encontradas sobre el ejercicio físico regular y la vigilancia o atención sostenida, es preciso comentar que sobre todo encontramos estudios entre-grupos. En este sentido, son destacables los escasos estudios que conocemos hasta el momento y que han evaluado participantes de edades tempranas (niños) también se dirigen hacia una relación positiva entre el nivel de condición física y la atención sostenida. Pontifex, Scudder, Drollette & Hillman, (2012) realizaron un estudio en el que midieron el rendimiento en vigilancia o atención sostenida en función del tiempo en tarea, mediante una tarea de flancos, en dos grupos de edad (pre-adolescentes con bajo nivel de condición físico vs pre-adolescentes con alto nivel de condición física). Los resultados obtenidos reflejaron un incremento en el ratio de errores por omisión y número de omisiones secuenciales en función del tiempo en tarea en participantes pre-adolescentes con baja condición física en relación al grupo alta condición física. Por otro lado, aunque también relacionado con la investigación anterior debido a que también usaron una tarea de flancos para investigar el curso temporal del rendimiento comportamental y el funcionamiento cerebral en pre-adolescentes con alto y bajo nivel de condición física. Chaddock et al., 2012 encontraron un decremento en el rendimiento a lo largo de la tarea en los ensayos incongruentes sólo en el grupo baja condición física, quienes evidenciaron un incremento en la activación bilateral de regiones cerebrales frontales y parietales a medida que transcurrió el tiempo de ejecución de tarea. Por el contrario, los participantes con alta condición física mostraron un decremento de la actividad en función del tiempo en tarea, aunque en el bloque temporal inicial, mostraron una mayor actividad respecto a los participantes con baja condición física.

Vinculado a las investigaciones anteriores, Bunce (2001) realizó una investigación con distintos grupos de edad (adultos jóvenes vs. mayores) en la que evaluó el rendimiento en vigilancia o atención sostenida en función del grado de complejidad de la tarea y el nivel de condición física de los participantes. Los resultados mostraron un menor decremento en vigilancia o atención sostenida en el grupo de mayores con alto nivel de condición física en comparación con el grupo de baja condición física en situaciones en las que la complejidad de la tarea poseía altas demandas de los recursos atencionales. No obstante, dichas diferencias entre grupos no fueron encontradas en los participantes adultos jóvenes.

En este contexto, es muy relevante la investigación de Pontifex et al., (2010) que evaluaron el rendimiento en función del tiempo en tarea de dos grupos de participantes pre-adolescentes con distinto nivel de condición física (alta capacidad física y baja capacidad física) usando la tarea de flancos de Eriksen. En los resultados se observó un incremento en número de errores por omisión y número de omisiones secuenciales en función del tiempo en tarea en participantes pre-adolescentes con baja condición física en relación al grupo alta condición física. Finalmente, ellos concluyeron diciendo que bajos niveles de condición física cardiovascular se relacionaron con un peor rendimiento en vigilancia.

Cabe destacar aquí las relevantes investigaciones de Luque-Casado et al., (2016a, 2016b) debido a que proporcionaron un paso adelante hacia la comprensión de los mecanismos fisiológicos que se encuentran tras una mejor capacidad de vigilancia o atención sostenida mostrada en individuos con un buen estado de condición física. Los resultados de sus investigaciones concluyen afirmando que sería de gran relevancia considerar la actuación del sistema nervioso autónomo en la relación entre el ejercicio físico y la cognición en general, y atención sostenida o vigilancia en particular. También importante para nuestro interés es el estudio de Ballester et al., (2015). Ballester y sus colegas investigaron la relación entre la participación deportiva regular (fútbol) y el desempeño en una tarea de vigilancia o atención sostenida. Dos grupos de varones y mujeres (atletas: $n=39$ y no atletas: $n= 36$) participaron en el estudio. Los resultados mostraron una relación positiva entre la capacidad física y la vigilancia o atención sostenida durante la adolescencia.

Recapitulando, la literatura existente en torno al importante rol que el ejercicio físico y nivel de condición física parecen desempeñar sobre el rendimiento en áreas implicando vigilancia, sin embargo la investigación al respecto es aún escasa y existen

variedad de cuestiones por resolver. Por un lado, como argumentábamos anteriormente es preciso destacar que de las evidencias encontradas en la literatura sobre el ejercicio físico regular y la vigilancia o atención sostenida, la mayoría de estudios muestran diseños experimentales entre-grupos. Estos estudios muestran limitaciones, ya que tan sólo pueden buscar relaciones entre vigilancia o atención sostenida y condición física de manera indirecta. Por esta razón, echamos en falta investigaciones que muestren intervenciones de entrenamiento en las que se puedan ver posibles vinculaciones causa-efecto.

Para finalizar, la relación existente entre la práctica crónica de ejercicio físico y/o el nivel de condición física y el funcionamiento cognitivo general, cabe destacar que prácticamente la totalidad de la literatura explica la asociación entre estas variables partiendo de la premisa de la hipótesis cardiovascular y principalmente muestras estudios en niños y en adultos mayores. Sin embargo, no conocemos investigaciones hasta el momento que hayan investigado sobre la relación existente entre el nivel de condición física cardiovascular y la atención sostenida en adultos jóvenes. De acuerdo con esta hipótesis, los beneficios en la función cognitiva que se asocian al ejercicio regular están mediados por la mejora de la condición física. Además, las adaptaciones fisiológicas que se atribuyen a la práctica regular de ejercicio físico, también se han vinculado con adaptaciones a nivel cerebral, que parecen repercutir de manera positiva sobre el rendimiento cognitivo (Colcombe et al., 2004, 2006; Hillman, Erickson & Kramer, 2008).

CAPÍTULO III

Planteamiento de la investigación y objetivos

La presente tesis doctoral se plantea con el propósito de intentar aportar novedosas evidencias empíricas que traten de ampliar y clarificar el conocimiento del efecto de la práctica de ejercicio físico sobre el funcionamiento atencional. El objetivo principal de esta tesis doctoral fue el de investigar los efectos de un esfuerzo puntual a diferentes intensidades sobre tareas de vigilancia y atención sostenida. Además, también se pretende valorar los efectos de un programa de entrenamiento (ejercicio regular) en vigilancia o atención sostenida y en el control inhibitorio. Para alcanzar la finalidad principal de la presente tesis, se llevaron a cabo 5 experimentos. Los Experimentos 1-4 hacen referencia a los efectos del ejercicio físico puntual sobre la vigilancia y atención sostenida. El Experimento 5 hace referencia a los efectos de un programa de ejercicio regular sobre la vigilancia y el control inhibitorio. A continuación procedemos a explicar y clarificar los Experimentos 1-5 realizados.

Experimentos 1, 2 y 3. Rendimiento en vigilancia durante el ejercicio físico puntual.

Con la realización de los Experimentos 1-3, se intentó dar un primer paso adelante e investigar la vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio físico puntual, teniendo a la intensidad del ejercicio como moderador. Con todo ello se pretende avanzar en un tema tan interesante como es el del ejercicio–cognición.

Nuestro objetivo principal fue el de demostrar que el rendimiento en vigilancia podría variar en función de la intensidad. Para alcanzar este objetivo realizamos tres experimentos. En el Experimento 1, se realizó un diseño intra-sujeto con los factores de condición de esfuerzo (esfuerzo incremental y de esfuerzo-bajo) y tiempo-en-tarea (4 bloques de 5' cada uno). Un grupo de estudiantes realizó la TVP durante 20' mientras pedaleaban en un cicloergómetro bajo dos condiciones de esfuerzo diferentes: de esfuerzo-bajo (20' a una intensidad baja) y de incremental (20' pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA, manteniéndose 5' en cada una de las intensidades).

En el Experimento 2, se disoció el efecto de la intensidad del tiempo en tarea. Los participantes realizaron la TVP en cuatro sesiones: 5' al 40% del UVA, 5' al 60% del UVA, 5' al 80% del UVA y 5' al 100% del UVA. En el Experimento 3, evaluamos nuevamente utilizando la TVP aunque en esta ocasión con una versión de 45' en una condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% del UVA y se comparó con una condición de esfuerzo-bajo (control). En base a la literatura previa consultada, esperamos encontrar

en el Experimento 1, conociendo las demandas atencionales que demanda la TVP, un mejor rendimiento en la tarea en las intensidades moderadas. Por tanto, cabría esperar que el mejor rendimiento en vigilancia se daría en las intensidades 60-80% del UVA y el mayor descenso los encontraríamos en la condición de 100% del UVA. Además, el Experimento 3 representará un paso adelante en la investigación del rendimiento de la vigilancia y su evolución temporal durante el ejercicio. En este experimento esperamos encontrar un decremento en el TR, en ambas condiciones, con el paso del tiempo-en-tarea. Además, esperamos TRs más bajos hacia la mitad de la condición de esfuerzo ligero-moderado y que cerca del final de la sesión aparezca en esta misma condición de esfuerzo una fatiga física que influya en la vigilancia inducida, todo con respecto a la condición de esfuerzo-bajo.

Experimento 4: Efectos del ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada en una tarea de vigilancia tipo “oddball”.

Con el objetivo de seguir avanzando en la presente tesis doctoral decidimos profundizar acerca de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, pero en esta ocasión modificando la tarea aplicada (tarea de atención sostenida tipo “oddball”). De acuerdo con la literatura previa, la modificación de la tarea supone un cambio en las demandas atencionales que se requerían en las anteriores investigaciones (Experimentos 1, 2 y 3). Además, se añade mayor dificultad perceptiva y se incrementaban las demandas en atención sostenida. Por lo tanto, con este tercer estudio nos sería posible evaluar los posibles cambios en discriminación perceptiva de manera concurrente a la realización de la actividad física, lo que no podía investigarse utilizando la TPV.

En este capítulo (Experimento 4), los participantes completaron la tarea “oddball” (con una probabilidad de aparición del objetivo de .1) mientras pedaleaban de manera concurrente bajo dos condiciones experimentales diferenciadas en la intensidad del esfuerzo: esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero-moderado. En base a la investigación previa realizada, esperamos obtener mayor exactitud en la tarea oddball durante condición de esfuerzo ligero-moderado con respecto al esfuerzo-bajo. Asimismo, esperamos encontrar un decremento en exactitud en ambas condiciones de esfuerzo con el tiempo-en-tarea y un incremento con el paso del tiempo en los TRs para los ensayos en los que aparecía el

estímulo objetivo en ambas condiciones de esfuerzo así como TRs más rápidos en el esfuerzo ligero-moderado que en la condición de esfuerzo-bajo.

Experimento 5. Efectos de una intervención de diez semanas de actividad física en la vigilancia y el control inhibitorio.

Los hallazgos obtenidos en los anteriores capítulos, que hacen referencia a los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (vigilancia y percepción), sugieren que el esfuerzo ligero-moderado aumenta la activación general y mejora la velocidad de respuesta en tareas de atención sostenida con independencia de la relevancia del estímulo objetivo.

Nuestro siguiente paso fue el de aportar evidencia empírica novedosa acerca de los efectos provocados por la actividad física realizada de forma regular en un grupo de personas sedentarias. Para alcanzar este fin, se diseñó el Experimento 5 en el que se analizaron los efectos de un programa de entrenamiento físico de diez semanas. Es preciso comentar que este Experimento fue un estudio de carácter exploratorio, con el fin de valorar la intervención, realizamos dos mediciones (pre-post). Posteriormente, se recogieron datos antropométricos y fisiológicos. Además, se completaron dos tareas cognitivas para evaluar el rendimiento en vigilancia o atención sostenida y para evaluar el control inhibitorio: 1) Sustained attention to response task (SART) y 2) Tarea de tiempo de reacción simple (TTRS).

En base a la evidencia previa, esperamos que las participantes mejoren tras la intervención. En primer lugar, esperamos que en la TTRS se reduzcan TRs tras la intervención, resultando en un mejor control inhibitorio. En segundo lugar, esperamos TRs más rápidos y mayor inhibición de respuestas en la SART tras la intervención de entrenamiento. Además, esperamos que estas mejoras cognitivas vengán acompañadas de una disminución del IMC y un aumento tanto en potencia máxima, potencia relativa y en el UVA.

CAPÍTULO IV

Experimentos 1, 2 y 3: Rendimiento en vigilancia durante el ejercicio físico puntual

Los Experimentos 2 y 3 forman parte de la publicación:

González-Fernández, F.T., Etnier, J.L., Zabala, M., & Sanabria, D. (en prensa). Vigilance performance during acute exercise. *International Journal of Sport Psychology*.

Resumen

La vigilancia, función cognitiva que determina la consecución de metas y la asignación de recursos atencionales, es crucial en muchas actividades diarias, que muchas veces implican actividad física. Aquí investigamos la vigilancia durante el ejercicio físico, con un interés particular en la intensidad. En el Experimento 1, se realizó un diseño intra-sujeto con los factores de condición de esfuerzo (esfuerzo incremental y de esfuerzo-bajo) y tiempo-en-tarea (4 bloques de 5' cada uno). Un grupo de estudiantes realizó la TVP durante 20' mientras pedaleaban en un cicloergómetro bajo dos condiciones de esfuerzo diferentes: de esfuerzo-bajo (20' a una intensidad baja) y de incremental (20' pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA, manteniéndose 5' en cada una de las intensidades). El Experimento 2 disoció el efecto de la intensidad del tiempo en tarea. Los participantes realizaron la TVP en cuatro sesiones: 5' al 40% del UVA, 5' al 60% del UVA, 5' al 80% del UVA y 5' al 100% del UVA. En el Experimento 3, los participantes realizaron una versión de 45' de la TVP en una condición de esfuerzo-bajo (control) y en una condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% del UVA. Tomados en conjunto, los resultados de los Experimento 1-3 sugieren que el rendimiento en vigilancia depende de la intensidad del ejercicio con un punto "óptimo" que oscila entre el 75-80% del UVA y que el efecto de esta intensidad "óptima" se mantiene constante en el tiempo, al menos durante 45'.

Introducción

El presente capítulo fue planteado como una primera aproximación empírica al estudio de la vigilancia o atención sostenida durante el ejercicio físico puntual teniendo en cuenta la intensidad del ejercicio como un moderador crucial. Hasta lo que sabemos, no existen estudios previos que hayan investigado el rendimiento en atención sostenida o vigilancia durante el ejercicio físico puntual. Por lo tanto, tomamos una aproximación o enfoque exploratorio al estudio de la vigilancia durante el ejercicio (véase Wagenmakers, Wetzels, Borsboom, Van der Mass & Kievit, 2012). Este capítulo de tesis describe tres experimentos diseñados para abordar esta cuestión.

En el Experimento 1, se investigó el rendimiento de los participantes en la TVP durante dos condiciones experimentales diferentes. La condición de esfuerzo-bajo (20' a una intensidad baja) y la condición de esfuerzo incremental (20' pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA, manteniéndose 5' en cada una de las intensidades). El diseño del Experimento 1 replicó estudios previos, de una sola sesión, que investigaron el efecto de la intensidad del ejercicio en el rendimiento cognitivo (Delignieres et al., 1994; Levit & Gutin, 1971; Reilly et al., 1986; Salmela & Ndoeye, 1986). El Experimento 2 fue diseñado para disociar el efecto del tiempo-en-tarea de la intensidad del ejercicio. En el Experimento 2, los participantes pedalaron en un cicloergómetro durante 5' mientras realizaban concurrentemente la TVP (pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA) en diferentes días. En el Experimento 3, se investigó el rendimiento en la TVP durante 45' a una intensidad de ejercicio al 75% del UVA y se comparó con una sesión a esfuerzo-bajo. Dos propósitos principales condujeron a la realización del Experimento 3: 1) observar si el ejercicio ligero-moderado aeróbico beneficiaría el rendimiento en vigilancia y 2) para investigar si se observaba este beneficio y se mantenía a lo largo de una sesión de ejercicio relativamente largo o si el efecto disminuiría con el tiempo-en-tarea.

El objetivo principal de los Experimentos 1-3 fue demostrar que el rendimiento en vigilancia podría variar en función de la intensidad del ejercicio con un rendimiento “óptimo” que podría oscilar entre el 60-80% de UVA, replicando así investigaciones previas realizadas sobre el rendimiento cognitivo durante el ejercicio puntual (ver Brisswalter et al., 2002). Dadas las altas demandas atencionales que requiere la TVP y teniendo en cuenta estudios previos, esperamos encontrar el mejor rendimiento en

vigilancia en las intensidades 60-80% del UVA y la mayor caída en el rendimiento (con respecto al rendimiento máximo) en la condición de 100% del UVA.

En resumen, el presente capítulo aborda la investigación sobre el tema del ejercicio–cognición, mediante la evaluación del rendimiento de la vigilancia de los participantes durante el ejercicio, considerando la intensidad del ejercicio como un moderador crucial en su rendimiento. Además, el Experimento 3 representa un paso más adelante en la investigación del rendimiento de la vigilancia durante el ejercicio, ya que se avanza en el estudio de la evolución temporal de los efectos del ejercicio sobre el rendimiento en vigilancia.

Método General

Participantes

Todos los participantes fueron seleccionados para el estudio mediante folletos informativos. Todos ellos poseían visión normal o corregida y no sufrían ningún trastorno físico o neurológico que pudiera afectar a los resultados de los Experimentos 1-3. Los participantes fueron informados sobre los objetivos de la investigación y firmaron un consentimiento donde se les detallaban los posibles beneficios y riesgos del mismo (ver Tabla 6). Veinte participantes y estudiantes de la Facultad de Kinesiología de la Universidad de Carolina del Norte en Greensboro (Experimento 1), veinticuatro participantes y estudiantes de la Facultad de Ciencias del Deporte de la Universidad de Granada (Experimento 2) y dieciocho participantes y estudiantes de la Facultad de Psicología de la Universidad de Granada (Experimento 3), participaron en este estudio a cambio de 30 \$ o créditos docentes extra para el Experimento 1 y a cambio de créditos docentes extra para los Experimentos 2 y 3. Ninguno de los participantes se incluyó en más de uno de los experimentos aquí presentados. El Comité de ética en la investigación de la Universidad de Carolina del Norte en Greensboro aprobó el Experimento 1 y el de la Universidad de Granada aprobó los Experimentos 2 y 3.

Tabla 6. Características antropométricas y fisiológicas de los Experimento 1-3 (media \pm DE).

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Características antropométricas			
Tamaño de la muestra	20	24	18
Género	12 mujeres	12 mujeres	18 mujeres
Edad (años)	20.70 \pm 1.75	20.29 \pm 0.95	19.94 \pm 1.98
Altura (cm)	170.60 \pm 9.06	170.92 \pm 9.34	163.33 \pm 2.85
Peso (kg)	71.40 \pm 11.98	66.70 \pm 8.91	61.32 \pm 6.31
Índice de Masa Corporal (IMC)	24.45 \pm 3.41	22.72 \pm 1.54	23.12 \pm 2.61
Parámetros fisiológicos en el test incremental submáximo			
Potencia máxima (W)	210 \pm 54.78	173.75 \pm 40.03	96.67 \pm 21.49
Potencia relativa (W/kg)	2.98 \pm 0.75	2.64 \pm 0.48	1.58 \pm 0.33
UVA (ml/kg/min)	26.98 \pm 8.2	34.26 \pm 6.32	23.72 \pm 5.61

Equipamiento y materiales

Se usó un pulsómetro Polar RS800CX (Polar Electro, Finlandia) para registrar la frecuencia cardiaca (FC) durante las sesiones experimentales. Los parámetros ventilatorios se midieron durante la prueba de esfuerzo incremental submáxima usando un sistema de medida Metabólica True One 2400 (Parvo Medics, Sandy, UT) en el Experimento 1 y un analizador de gases Jaeger Master Screen y un cicloergómetro Viasprint 150 P en el los Experimentos 2 y 3. Los datos de FC fueron codificados con el Software Polar ProTrainer 5. Además de los datos de FC, se midió la percepción subjetiva del esfuerzo (PSE) inmediatamente después de las sesiones experimentales. La PSE fue registrada mediante la escala de Borg (Borg, 1982) que posee un rango de percepción del esfuerzo que va desde 6 (muy ligero) a 20 (muy muy duro).

Para presentar los estímulos de la TVP, se utilizó un ordenador portátil (14'' en el Experimento 1 y 15.6'' en el Experimento 2 y 3). El centro de la pantalla del portátil se encontraba situado entre 60 y 80 cm de la cabeza de los participantes y al nivel de sus ojos. El software de E-Prime (Psychology Software Tools, Pittsburgh, PA, USA) se utilizó para controlar la presentación de los estímulos y la recogida de datos. Las

respuestas de los participantes fueron recogidas mediante un pulsador inalámbrico (Duronic SP400 Smart-Pointer Pro 2.4 Ghz) conectado al ordenador a través de un puerto USB-2.0 (ver Figura 9).



Figura 9. Set experimental. Participante realizando la tarea comportamental mientras pedalea en el cicloergómetro.

Tarea de Vigilancia Psicomotora

La TVP consiste en la presentación de un fondo negro con un círculo rojo vacío en el centro de la pantalla. Después de un intervalo temporal aleatorio que oscila entre los 2000 y 10000 ms, el círculo rojo empieza a completarse a una velocidad angular de 0.094 grados por segundo (ver Figura 10). Los participantes tenían que presionar el pulsador lo más rápido posible cuando el círculo empezaba a completarse. Respondían con su mano dominante intentando no anticiparse. Se dieron instrucciones verbales y escritas a los participantes antes de comenzar la TVP en cada sesión experimental. El experimentador hizo hincapié en que los participantes debían responder lo más rápido posible, evitando

las anticipaciones y que debían mantener la mirada en el centro de la pantalla. Después de la respuesta, al participante se le proporcionaba feedback sobre el TR obtenido durante 300 msec. También fueron registradas e indicadas las anticipaciones y se les proporcionó un feedback con la frase “¡Has pulsado demasiado rápido!” si cometían una anticipación. El número exacto de ensayos de cada participante dependió de la latencia de respuesta del individuo.

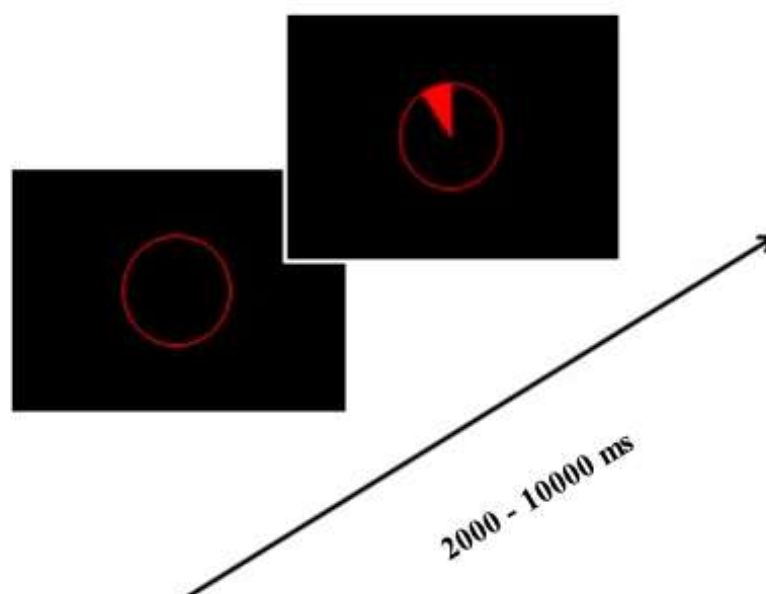


Figura 10. Ejemplo de un ensayo de la tarea de vigilancia psicomotora.

Utilizamos la misma tarea comportamental en los Experimentos 1-3. En el caso del Experimento 1 tuvo una duración de 20' y los participantes completaron 182.36 (\pm 2.45) ensayos en la condición de esfuerzo incremental y 184.25 (\pm 2.59) ensayos en la condición de esfuerzo-bajo). En el Experimento 2 tuvo una duración de 5' en cada condición de esfuerzo y los participantes completaron 47.46 (\pm 2.55), 48.38 (\pm 2.61), 48.17 (\pm 2.39), 46.83 (\pm 2.18), ensayos en la condición de esfuerzo del 40%, 60%, 80 y 100% del UVA, respectivamente. En el caso del experimento 3 tuvo una duración de 45' y los participantes completaron 430.94 (\pm 9.42) y 432.94 (\pm 10.68) ensayos en las condiciones de esfuerzo ligero-moderado y de esfuerzo-bajo, respectivamente.

Procedimiento

Los participantes visitaron laboratorio en tres ocasiones diferentes en el Experimento 1 y 3, mientras que en el Experimento 2 lo hicieron en cinco ocasiones. Siempre a la misma hora del día (entre las 9:30 am - 5:00 pm) y en sesiones separadas por al menos 48 horas y no más de 96 horas. En la primera sesión, inmediatamente después de la llegada de los participantes al laboratorio, se les colocaba la banda de registro del pulsómetro para monitorizar la FC durante la totalidad de la sesión experimental. Posteriormente, los participantes realizaron un test de esfuerzo incremental submáximo en cicloergómetro con una máscara conectada a un carro metabólico (ver Tabla 1). Para la realización de este test de esfuerzo incremental sub-máximo, seguimos las directrices propuestas por el ACSM (ACSM, 2010), con el fin de garantizar la seguridad de los participantes. Los participantes fueron instruidos para pedalear a una cadencia fija de 60 revoluciones por min (rpm). Se utilizó el protocolo de Astrand (Astrand, 1965) que comenzaba con un periodo de calentamiento a 0 W, con incrementos de 10 W cada minuto hasta el minuto 5. Después de estos 5' de calentamiento comenzaba la fase de ejercicio pedaleando a 50 W, incrementándose la carga 25 W en mujeres y 50 W en hombres cada 2'. Después de cada incremento, la carga de trabajo permaneció estable durante los siguientes 2'. La determinación del UVA se basó en el método del intercambio gaseoso (RER) [(RER) = CO₂ producido/O₂ consumido], estableciendo que se había llegado al UVA cuando el RER era igual a 1.00 (Myers & Ashley, 1997; Yeh et al., 1995) y no volvía a caer por debajo de ese nivel durante la fase de carga constante de 2', o cuando se subía un nuevo escalón de carga y se acercaba a un RER de 1.1. El test de esfuerzo incremental submáximo finalizó cuando se alcanzó el UVA que se midió en ml*kg⁻¹*min⁻¹. Los resultados de este test se usaron para establecer la carga de trabajo de forma individualizada en las condiciones experimentales posteriores. Después de completar el test de esfuerzo incremental submáximo, los participantes tuvieron aproximadamente 5' para recuperarse y completaron 8-10 ensayos de la TVP mientras pedaleaban para familiarizarse con la tarea.

En el Experimento 1, en la segunda y tercera sesión, los participantes completaron la TVP mientras pedaleaban en dos condiciones experimentales diferentes. En la condición de esfuerzo en rampa, después de 3' de calentamiento, los participantes pedalearon durante 20' con incrementos progresivos en la carga (correspondiéndose con el 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA) y permaneciendo 5' en cada intensidad. En la

condición de esfuerzo-bajo, los participantes pedaleaban durante 20' a una carga de trabajo baja que tan sólo servía para controlar la inercia de la rueda. Con esta condición, controlamos los efectos no deseados de la doble tarea. Los participantes debían mantener una cadencia fija de 55-60 rpm en ambas sesiones. El orden de la realización de las sesiones fue contrabalanceado entre los participantes.

En el Experimento 2, los participantes completaron 4 sesiones experimentales en días separados y el orden de realización de las sesiones fue contrabalanceado. En cada sesión, después de 3' de calentamiento, los participantes realizaron la TVP durante 5' mientras pedaleaban a cada una de las intensidades propuestas: 40%, 60%, 80% y al 100% del UVA.

En el Experimento 3, los participantes completaron la TVP, después de 3' de calentamiento, los participantes completaron la TVP durante 45' de mientras pedaleaban bajo dos condiciones experimentales diferentes: 45' de ejercicio puntual de esfuerzo-bajo (igual que en el experimento 1) y 45' de ejercicio puntual de esfuerzo ligero-moderado correspondiente al 75% del UVA. El orden de realización de las condiciones de esfuerzo fue contrabalanceado a través de los participantes.

En los 3 experimentos, el experimentador monitorizó la FC de los participantes y se aseguraba de que todos los participantes estaban pedaleando a la intensidad deseada (reduciendo o incrementando la carga del cicloergómetro de 1 en 1 W).

Diseño y análisis estadísticos

En el Experimento 1, se utilizó un diseño intra-sujeto con los factores condición de esfuerzo (esfuerzo incremental y de esfuerzo-bajo) y tiempo-en-tarea (4 bloques de 5' cada uno).

En el Experimento 2, se utilizó un diseño unifactorial intra-sujeto con el factor condición de esfuerzo (40%, 60%, 80 y 100% del UVA).

En el Experimento 3, se utilizó un diseño intra-sujeto con los factores condición de esfuerzo (esfuerzo ligero-moderado y esfuerzo-bajo) y tiempo-en-tarea (9 bloques de 5' cada uno).

Los ensayos con TRs por debajo de 100 ms (1.01% para el Experimento 1, 1.39% para el Experimento 2 y 0,87%, para el Experimento 3) se consideraron como errores de anticipación y fueron descartados del análisis (Luque-Casado et al., 2016, a,b).

Los datos de PSE y de FC del Experimento 2 y los TRs del Experimento 1-3, se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas. Además, los efectos estadísticamente significativos fueron analizados mediante pruebas t student pareadas corregidas por la prueba Holm-Bonferroni para comparaciones múltiples (PSE y FC de los Experimentos 1 y 3). El tamaño del efecto se indica con la d de Cohen para las pruebas t y el η^2 parcial para las FS. La corrección de Greenhouse-Geisser fue aplicada cuando la esfericidad de los datos fue violada (Jennings & Wood, 1976). En ese caso, se presentan los valores de probabilidad corregidos.

Resultados

Experimento 1

Una prueba t con los datos de PSE, $t(20)=15,01$, $p<.001$, $d=4.42$ y FC, $t(20)=-9.40$, $p<.001$, $d=2.61$, mostró valores más altos en la condición de esfuerzo en rampa que en la condición de esfuerzo-bajo, en ambos casos (ver Tabla 7).

Un ANOVA de medidas repetidas con la media de los TR de los participantes, reveló un efecto principal significativo de tiempo-en-tarea, $F(3, 57)=23,79$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{parcial}}=.55$, mostrando un incremento lineal del TR. Ni el efecto principal de condición de esfuerzo, $F(1, 19)=1,35$, $p<.25$, $\eta^2_{\text{parcial}}=.066$, ni la interacción entre la condición de esfuerzo y el tiempo-en-tarea, $F<1$, fueron significativos (ver Figura 11).

Dado que la intensidad incrementaba al mismo tiempo que el tiempo-en-tarea en el Experimento 1, no fue posible dissociar el efecto de ambos factores sobre el rendimiento de los participantes en la TVP. Por ejemplo, podría haberse dado el caso en el que el entrecimiento de los TR con el paso del tiempo fuera tan fuerte que no permitiera observar las diferencias en la condición de esfuerzo (con respecto a la condición de bajo-esfuerzo) al 80% del UVA (o incluso en el esfuerzo al 60% del UVA) en comparación con el primer de los escalones (40% del UVA) en la condición de esfuerzo incremental. En otras palabras, el robusto efecto de tiempo-en-tarea (es decir, el incremento del TR con el paso del tiempo) ocultó cualquier efecto selectivo de la intensidad (ver Sanabria, Capizzi & Correa, 2011, para un razonamiento similar).

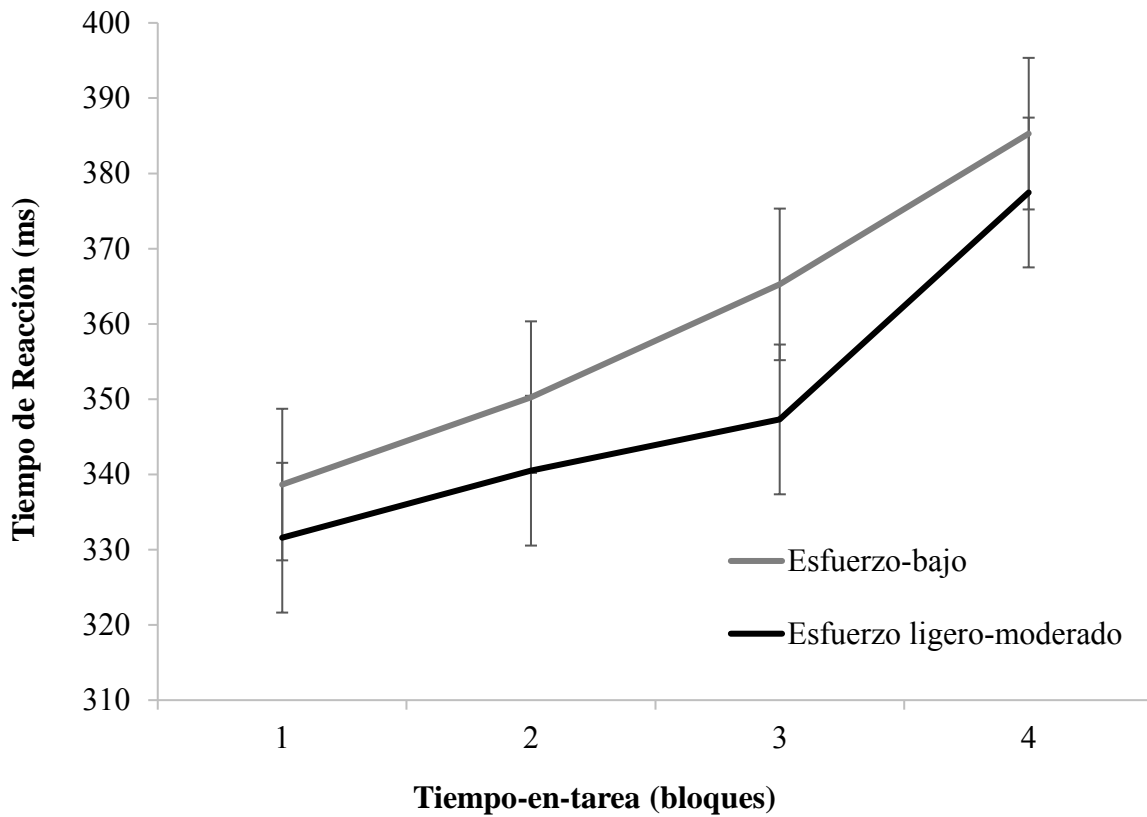


Figura 11. Media TR (media \pm SE) en función de la condición de esfuerzo y tiempo-en-tarea en el Experimento 1.

Experimento 2

Un ANOVA de medidas repetidas con la media de los datos de PSE de los participantes (ver Tabla 7), reveló un efecto principal de esfuerzo, $F(3, 69)=496,48$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partial}}=.95$. Las pruebas T mostraron diferencias significativas entre todas las condiciones, todas las $ps<.001$. Un ANOVA de medidas repetidas con la media de los datos de FC de los participantes (ver Tabla 7), reveló un efecto principal de esfuerzo, $F(3, 69)=6852,50$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partial}}=.99$. Las pruebas T mostraron diferencias significativas entre todas las condiciones, todas las $ps<.001$.

Un ANOVA de medidas repetidas con la media de los TR de los participantes, reveló un efecto principal de esfuerzo, $F(1.44, 33.17)=7.87$, $p<.01$, $\eta^2_{\text{partial}}=.25$ (ver Figura 12). El TR siguió una tendencia cuadrática, $F(1, 23)=19,00$, $p=.001$, con el pico de rendimiento en la condición de esfuerzo al 80% del UVA (321 ± 24.72) y el peor rendimiento en la condición de intensidad al 100% del UVA (370 ± 74.40 ms). Las

comparaciones por pares mostraron diferencias en la media de TRs entre la condición de esfuerzo al 80% del UVA y el 100% del UVA, $t(23)=-3.61, p<.008, d=-0.89$ y entre la condición de esfuerzo al 60% del UVA y la condición de esfuerzo al 100% del UVA, $t(23)=-3.25, p<.017, d=-0.71$. La comparación entre la condición de esfuerzo al 60% del UVA y el 80% del UVA, $t(23)=2.67, p<.054, d=0.42$, y la comparación entre la condición de esfuerzo al 40% del UVA y la condición de esfuerzo al 80% del UVA, $t(23)=2.41, p<.072, d=0.56$, no alcanzaron la significación estadística. La comparación entre la condición de esfuerzo al 40% del UVA y la condición de esfuerzo al 60% del UVA y la comparación entre la condición de esfuerzo al 40% del UVA y la condición de esfuerzo al 100% del UVA, no fueron significativas, $t(23)=1.08, p<.10, d=0.25$ and $t(23)=-2.02, p<.28, d=-0.54$, respectivamente.

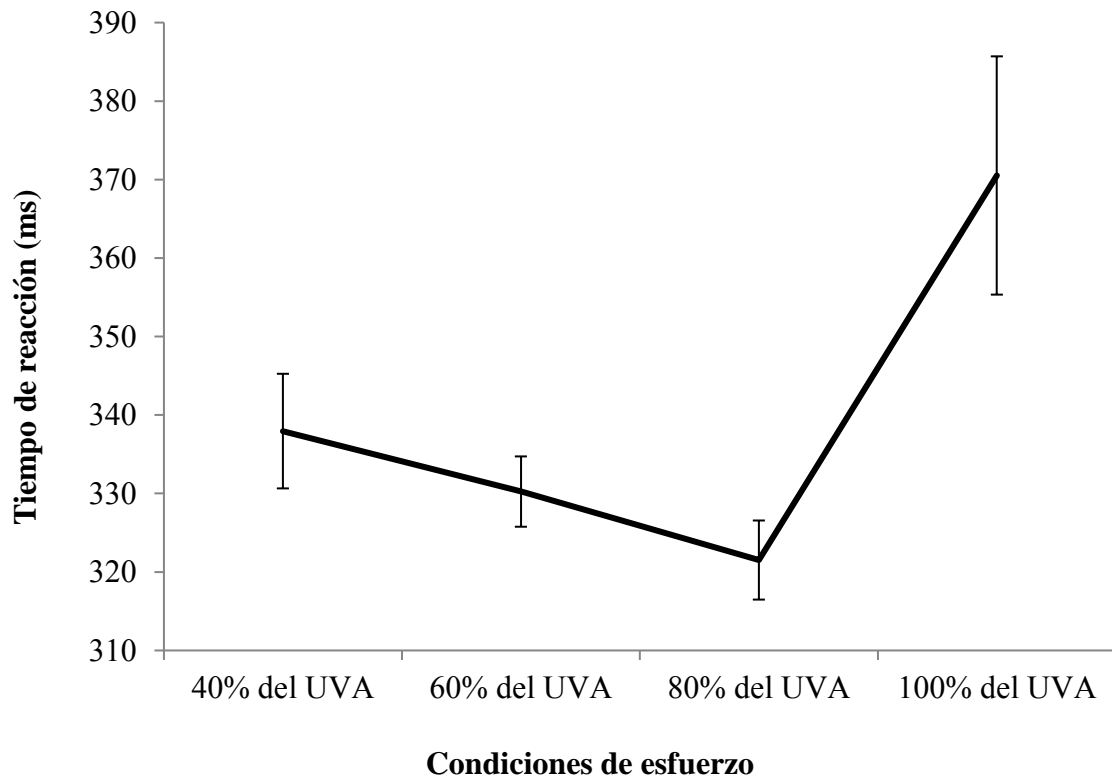


Figura 12. Media de los TRs en función de la condición de esfuerzo y el tiempo en tarea en el Experimento 2.

Los resultados del Experimento 2 mostraron un pico de rendimiento en el 80% del UVA en una versión de la TVP de 5'. En el Experimento 3, decidimos utilizar una intensidad ligeramente menor (75% del UVA) para investigar si el efecto beneficioso en

vigilancia, encontrado en la intensidad “óptima”, se podría observar en una sesión de ejercicio sustancialmente más larga. De esta manera, aseguramos un esfuerzo constante de larga duración (45’). De hecho, la intensidad al 75% del UVA en el Experimento 3 mostró la misma PSE que a la intensidad del 80% del UVA del Experimento 2. Además, la diferencia entre los esfuerzos relativos de ambas intensidades (80% del UVA y 75% del UVA) fue solo de 9 lpm, sobre un 3% FC_{max} (ver Tabla 7).

Experimento 3

Una prueba t con los datos de PSE y FC mostró valores más altos en la condición de esfuerzo ligero-moderado que en la condición de esfuerzo-bajo, en ambos casos, $t(18)=3,55$, $p<.001$, $d=1.90$, y $t(18)=11,41$, $p<.001$, $d=3.82$, respectivamente (ver Tabla 7).

Un ANOVA con la media de los TRs de los participantes reveló un efecto principal significativo de esfuerzo, $F(1, 17)=5,24$, $p<.03$, $\eta^2_{\text{partial}}=.24$, con TRs más bajos en la condición de esfuerzo ligero-moderado que en la de esfuerzo-bajo. El análisis reveló un efecto principal de tiempo-en-tarea, $F(3,03)=51,62$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partial}}=.50$, mostrándose incremento lineal del TR durante el transcurso de la tarea. La interacción entre la condición de esfuerzo y el tiempo-en-tarea no fue significativa, $F<1$ (ver Figura 13).

Llegado a este punto, nos preguntamos si el efecto en el rendimiento de la TVP (con respecto a la condición de esfuerzo-bajo) en la condición de esfuerzo puntual al 75% del UVA en el Experimento 3 fue significativamente diferente de la condición del esfuerzo puntual al 80% del UVA del Experimento 2. De ser así, cabría esperar una interacción estadísticamente significativa entre Experimento (2, 3) y condición de esfuerzo (esfuerzo-bajo, esfuerzo ligero-moderado). Seleccionamos los datos del 40% del UVA como la condición de esfuerzo-bajo del Experimento 2. Los datos de los primeros 5’ de cada sesión de esfuerzo en el Experimento 3 fueron introducidos en el análisis.

Un ANOVA con la media de los TRs de los participantes reveló un efecto principal significativo de experimento, $F(1, 40)=10.72$, $p<.002$, $\eta^2_{\text{partial}}=.21$, con TRs más bajos en el Experimento 2 que en el Experimento 3. El análisis también reveló un efecto principal de condición de esfuerzo, $F(1, 40)=8,03$, $p<.01$, $\eta^2_{\text{partial}}=.16$, mostrándose TRs más bajos en el esfuerzo ligero-moderado que en esfuerzo-bajo. Crucialmente, la interacción entre experimento y condición de esfuerzo no fue significativa, $F<1$.

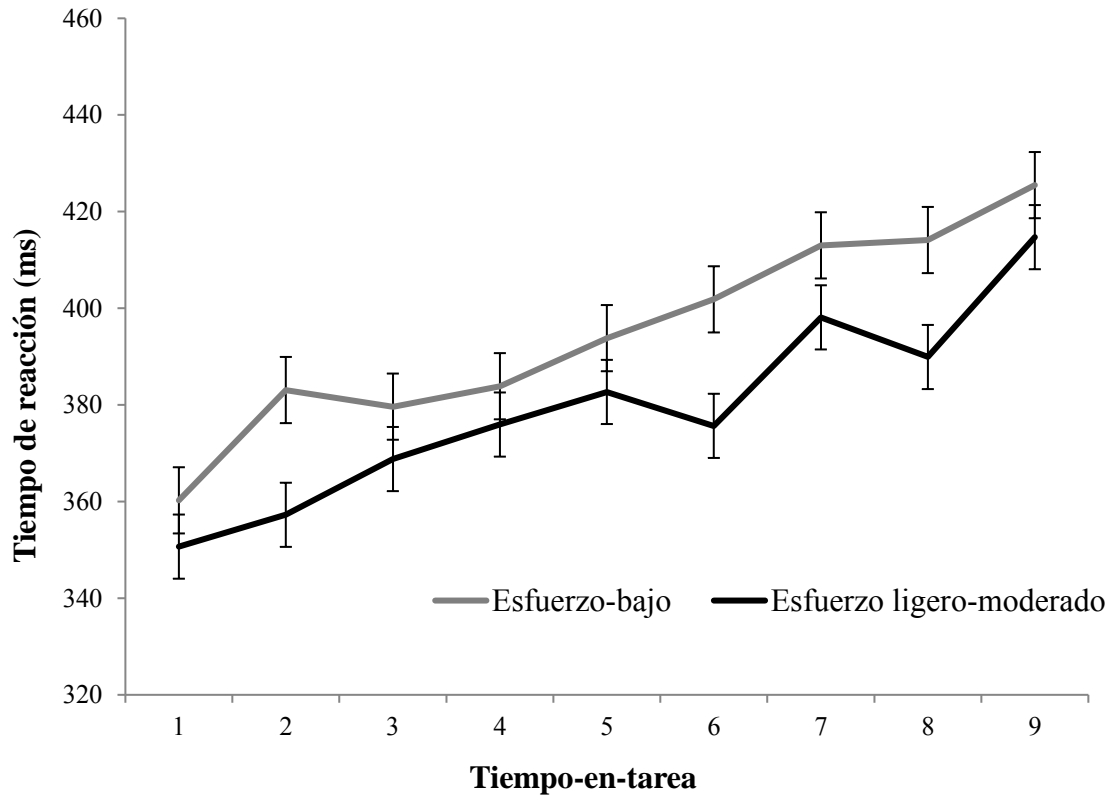


Figura 13. Media TR (media \pm Se) en función de la condición de esfuerzo y el tiempo-en-tarea en el Experimento 3.

Tabla 7. Parámetros fisiológicos en los Experimentos 1-3 (media ± DE).

Experimento 1				
Condición de Esfuerzo	FC (lpm)	% de la FC_{max}	% del UVA	PSE
Esfuerzo-bajo				
De 0' a 5'	95 ± 13	50.29 ± 7.88	59,32 ± 8,63	
De 5' a 10'	96 ± 12	50.29 ± 6.35	59,94 ± 8,94	8.50 ± 1.40
De 10' a 15'	94 ± 12	49.76 ± 6.35	59,32 ± 8,26	
De 15' a 20'	94 ± 12	49.76 ± 6.35	58.89 ± 8,24	
Esfuerzo incremental				
40% del UVA	94 ± 13	49.80 ± 6.67	59,44 ± 0,23	
60% del UVA	99 ± 10	52.54 ± 5.46	62,81 ± 6,55	18.90 ± 0.97
80% del UVA	128 ± 7	67.77 ± 3.68	81,02 ± 4,44	
100% del UVA	160 ± 7	84.92 ± 3.47	101.53 ± 4,17	
Experimento 2				
Condición de Esfuerzo	FC (lpm)	% de la FC_{max}	% del UVA	PSE
40% del UVA				
Muy Ligera <50% de la FC _{max}	79 ± 9	40.77 ± 4.51	49.53 ± 5.69	6.75 ± 0.74
60% del UVA				
Ligera 50- <64% de la FC _{max}	97 ± 5	50.05 ± 2.76	60.45 ± 1.86	8.67 ± 1.01
80% del UVA				
Moderada 64-<77% de la FC _{max}	129 ± 7	66.57 ± 3.82	80.27 ± 3.48	12.17 ± 1.09
100% del UVA				
Vigorosa 85-<100% de la FC _{max}	159 ± 12	82.05 ± 6.23	99.07 ± 6.64	16.92 ± 1.35
Experimento 3				
Condición de Esfuerzo	FC (lpm)	% de FC_{max}	% del UVA	PSE
Condición de Esfuerzo-bajo				
Carga Baja	84 ± 7	43.97 ± 1.45	52.13 ± 4.20	8.83 ± 2.07
Condición de Esfuerzo Ligero-moderado. 75% del UVA				
	120 ± 11	63.04 ± 0.80	74.25 ± 6.97	12.39 ± 1.65

La FC está indicada en latidos por minuto. La FC_{max} fue estimada usando la fórmula (208 – [0.7 x edad]) propuesta por Tanaka, Monahan & Seals (2001)

Discusión

Se requieren altos niveles de vigilancia en múltiples comportamientos, muchos de ellos implicados en actividades deportivas. Sin embargo, como dijimos anteriormente, falta evidencia empírica con respecto al rendimiento en vigilancia durante el ejercicio puntual. Aquí, investigamos la vigilancia durante el ejercicio físico, con un interés particular en la intensidad incremental. Este capítulo de tesis recoge el 3 Experimentos para abordar este tema de importante consideración para nosotros.

Los datos de FC y PSE del Experimento 1-3 confirmaron que las condiciones de esfuerzo estaban claramente diferenciadas en términos de exigencia física. Sin embargo, los resultados de TR en el Experimento 1 sólo mostraron el típico efecto de tiempo-en-tarea (es decir, incrementos de TR con el paso del tiempo). Los resultados del Experimento 2 sustentan la idea de que el efecto robusto del tiempo-en-tarea en el Experimento 1 ocultó el efecto selectivo de intensidad del ejercicio en la sesión de esfuerzo incremental. Esto debería ser considerado en la investigación futura sobre los efectos selectivos de la intensidad del ejercicio durante la ejecución de tareas que son propensas a la disminución de la atención con el paso del tiempo (como la TVP utilizada aquí).

Los resultados del Experimento 2 confirmaron nuestra hipótesis principal de la función moderadora de la intensidad en la relación entre el ejercicio y el rendimiento en vigilancia. Estos hallazgos apoyan las revisiones meta-analíticas que mostraron un efecto significativo diferencial de intensidad sobre el rendimiento cognitivo evaluado durante el ejercicio (Chang et al., 2012). Los resultados de los Experimentos 2 y 3 del presente estudio confirmaron que el estado de vigilancia de los participantes cambiaba durante el ejercicio (en comparación con la condición de esfuerzo-bajo) y que este estaba moderado por la intensidad de la actividad física. Estos hallazgos amplían la investigación previa sobre el tema de la cognición-durante-ejercicio para el caso de la vigilancia o atención sostenida. Es importante destacar que todas las condiciones de esfuerzo fueron igualadas en función de las demandas de la tarea dual. Por lo tanto, cualquier variación en el rendimiento en vigilancia fue presumiblemente debido a los cambios fisiológicos inducidos por la condición de esfuerzo particular.

En los Experimentos 2 y 3, teníamos como objetivo principal investigar el rendimiento en vigilancia en función de la intensidad del ejercicio. Los resultados mostraron que el rendimiento en vigilancia depende de la intensidad del ejercicio con un punto “óptimo” en el 80% del UVA. Sin embargo, este novedoso hallazgo obtenido fue observado en un ejercicio puntual de tan sólo 5'. Por todo ello, realizamos el Experimento 3, ya que queríamos observar si el efecto beneficioso en vigilancia del ejercicio a intensidad ligera-moderada se podría observar a lo largo de una sesión de ejercicio más larga. El Experimento 3 fue diseñado para abordar esta cuestión, comparando el TR con una versión de 45' de la TVP realizada bajo dos condiciones experimentales diferentes: 45' de ejercicio puntual de esfuerzo-bajo (igual que la del Experimento 1) y 45' de ejercicio puntual de esfuerzo ligero-moderado correspondiente al 75% del UVA. La selección de la intensidad (75% de la UVA) y la duración (45') del ejercicio puntual fue intencional, apoyados en los resultados del Experimento 1 y 2 que habían mostrado un pico de rendimiento en el 80% del UVA en una versión del UVA en una versión de la TVP de 5'. Aquí, decidimos utilizar una intensidad correspondiente al 75% del UVA, con el fin de asegurar un esfuerzo constante durante 45' de ejercicio puntual y para reducir la probabilidad de sufrir efectos no deseados por la fatiga periférica, ya que estos podrían interferir con la respuesta motora en la TVP. Elegimos 45' también para aumentar las exigencias en vigilancia (Davies & Parasuraman, 1982).

Los resultados del Experimento 3 revelaron un efecto principal de condición de esfuerzo en el que se mostraron TRs más rápidos en la condición de esfuerzo a intensidad ligera-moderada que en la condición de esfuerzo-bajo con similares demandas cognitivas, pero que se diferenciaban en términos de activación inducida. Curiosamente, esta mejora en los TRs estuvo presente durante toda la tarea a pesar de que los 45' de la condición de esfuerzo ligero-moderado causaran mayor frecuencia cardíaca y mayor esfuerzo percibido en comparación con la condición de esfuerzo-bajo. Señalamos el aumento de la activación/arousal producida por el ejercicio como la causa más probable de esta mejora global del TR en la TVP. El efecto principal de tiempo-en-tarea también fue significativo, mostrando como el TR aumentaba gradualmente con el transcurso de la tarea. La interacción nula junto con el efecto principal de la condición de esfuerzo, sugiere que, aunque el rendimiento en ambas condiciones sufrió una disminución similar en el tiempo-en-tarea, la condición de esfuerzo ligero-moderado dio lugar a una mejora en TR a lo largo de toda la tarea respecto a la condición de esfuerzo-bajo. Crucialmente, el efecto

del esfuerzo puntual al 75% del UVA en el Experimento 3 no fue significativamente diferente del esfuerzo puntual al 80% en el Experimento 2, sugiriendo este resultado que la ligera reducción en la intensidad no afectó al efecto beneficioso del ejercicio sobre la vigilancia. Téngase en cuenta también que los resultados del Experimento 3 parecen contradecir los resultados que se han mostrado meta-analíticamente y que sugerían que se necesitan al menos 20' de ejercicio para observar mejoras del rendimiento cognitivo (Chang et al., 2012).

El ejercicio físico provoca una gran variedad de alteraciones fisiológicas (por ejemplo, aumentos en la temperatura corporal, en el flujo sanguíneo cortical, en la FC, la concentración de catecolaminas; ver McMorris & Hale, 2015). La mayoría de estas respuestas fisiológicas se han relacionado con una mayor activación/arousal (que se relacionan con la activación/excitabilidad de las neuronas corticales; Langner & Eickhoff, 2013; Oken, Salinsky & Elsas, 2006) que a su vez han podido ser responsables de las variaciones observadas en el rendimiento de la TVP en función de la intensidad del ejercicio. Curiosamente, el pico máximo de vigilancia se encontró en la intensidad de esfuerzo ligero-moderado. Por un lado, este último resultado es consistente con estudios recientes que sugieren que la actuación del sistema reticular durante el ejercicio moderado podría aumentar el rendimiento cognitivo (Dietrich & Audiffren, 2011; McMorris & Hale 2012). De hecho, existe una gran cantidad de literatura que apoya la noción de que el rendimiento en la TVP depende del estado de activación del participante. Por ejemplo, la investigación previa ha encontrado variaciones en el rendimiento de la TVP en función de la falta de sueño (Dorrian, Rogers & Dinges, 2005) o en función de la hora del día la que se está llevando a cabo la tarea (Correa et al., 2014). En estos estudios, el rendimiento máximo en la TVP era normalmente encontrado sin privación del sueño y en el momento “óptimo” del día (que depende de los ritmos circadianos individualizados). Por otro lado, el ejercicio a intensidad ligera-moderada podría haber mejorado también el control atencional, tal y como sugieren investigaciones realizadas previamente (McMorris et al., 2009; Pesce, Capranica, Tesitore & Figura, 2002). Por lo tanto, dadas las altas demandas atencionales de la TVP, sería razonable afirmar que el ejercicio a intensidad ligera-moderada mejoró el rendimiento por un aumento del control atencional. Mientras que el 75-80% del VAT de esfuerzo puntual parecía mejorar el rendimiento de la TVP, los TRs más lentos en el Experimento 1 fueron encontrados en la condición de esfuerzo al 100% del UVA. Ese efecto perjudicial del ejercicio sobre el rendimiento cognitivo en la TVP fue similar al observado en estudios previos que habían medido el rendimiento en

tareas con altas demandas atencionales durante el ejercicio a alta intensidad (Ver Brisswalter, et al., 2002, Chang et al., 2012; Lombourne & Tomporowki, 2010, para una revisión).

El aumento de la intensidad del ejercicio hasta el 100% del UVA podría haber sido resultado por el aumento del nivel de arousal/activación por encima de una zona de funcionamiento “óptimo” para la TVP. Concretamente, esta afirmación está de acuerdo con la teoría de Yerkes-Dodson (Yerkes & Dodson, 1908), que sugiere que el rendimiento mejora con el aumento del arousal/activación hasta un nivel de arousal “moderado” y luego muestra perjuicios por incrementos adicionales del arousal. Alternativamente, también podría haber sido inducido por una alta competencia o demanda entre la TVP y la realización de la tarea en el cicloergómetro (que exigía a los participantes a mantener la intensidad de esfuerzo y la velocidad de pedaleo constante durante 5’) resultando como un efecto perjudicial en la TVP (véase Dietrich & Audiffren, 2011; Pontifex & Hillman, 2007). En todo caso, de acuerdo con los resultados obtenidos, afirmamos que el rendimiento en vigilancia depende de la intensidad del ejercicio con un punto “óptimo” que oscila entre el 75-80% del UVA y que el efecto de esta intensidad “óptima” se mantiene constante en el tiempo, al menos durante 45’.

Los resultados obtenidos en los Experimentos 2-3 parecen ajustarse a la hipótesis de la hipofrontalidad transitoria de Dietrich et al., (2003, 2006). Según la hipótesis de la hipofrontalidad transitoria, los recursos cerebrales utilizados por las aéreas involucradas en el procesamiento motor para llevar a cabo el ejercicio físico compiten con los recursos necesarios para el funcionamiento del sistema ejecutivo (Chang et al., 2012; Dietrich, 2006). Por consiguiente, durante el ejercicio que realizaron nuestros participantes (independientemente de la intensidad a la que se hizo), esta hipótesis sugiere que existe una activación masiva y sostenida de los sistemas motores y sensoriales en detrimento de la actividad en otras estructuras neuronales. Por esta razón, se produce una inhibición temporal de las regiones cerebrales que no son esenciales para ejecutar el ejercicio específico que ocupa en ese momento. Así, las intensidades iguales o inferiores al 75-80% no provocaron déficit de recursos metabólicos por lo que el rendimiento cognitivo no se ve empeorado. Sin embargo, cuando la intensidad llega al 100% del UVA, se originará un gran déficit de recursos metabólicos disponibles para otras regiones cerebrales involucradas en mantener un nivel óptimo de atención, provocando así el enlentecimiento del TR (Dietrich, 2003, 2006).

En resumen, el presente estudio demostró que el estado de vigilancia se ve afectado durante el ejercicio y que la intensidad del ejercicio determina el rendimiento en una tarea de vigilancia con altas demandas atencionales. También contribuye a la investigación existente sobre el rendimiento cognitivo durante el ejercicio y aunque se necesitaran investigaciones futuras para dilucidar los mecanismos subyacentes que explican este efecto, se abren vías interesantes para futuras investigaciones básicas y aplicadas.

CAPÍTULO V

Experimento 4: Efectos del ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada en una tarea de vigilancia tipo “oddball”

Resumen

En el presente capítulo de tesis se investigaron los efectos de un esfuerzo físico puntual a intensidad ligera-moderada, correspondiente al 75% del UVA, sobre la atención sostenida o vigilancia. Para lograr nuestro objetivo, un grupo de mujeres jóvenes universitarias realizaron una tarea de discriminación perceptiva tipo “oddball” (con una probabilidad de aparición del objetivo de .1) mientras pedaleaban en un cicloergómetro bajo dos condiciones experimentales diferenciadas en la intensidad del esfuerzo: esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero-moderado. Los resultados mostraron que el esfuerzo ligero-moderado mostró una tendencia a mejorar los TRs a lo largo de toda la tarea si bien no se encontraron diferencias en exactitud para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo ni en la exactitud a los estímulos no objetivos. En su conjunto, los resultados sugieren que el esfuerzo ligero-moderado aumentó la activación general de las participantes acelerando las respuestas ante estímulos impredecibles sin afectar a la exactitud en la respuesta.

Introducción

En los Experimentos 1-3 teníamos como objetivo principal investigar rendimiento en atención sostenida o vigilancia se veía afectado durante un esfuerzo puntual. Para medir la atención sostenida o vigilancia utilizamos la TVP (Wilkinson & Houghton, 1982), tarea que ha demostrado su fiabilidad y alta sensibilidad a los decrementos en vigilancia (e.g., Basner & Dinges, 2011). Los resultados obtenidos mostraron una mejora en el rendimiento en vigilancia durante una serie de ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada con respecto a la condición control con similares demandas cognitivas, pero con diferencias en términos de demandas físicas. Además, el efecto de este esfuerzo a intensidad ligera-moderada se mantuvo constante en el tiempo, al menos para 45’.

La TVP es una tarea con alta incertidumbre temporal entre estímulos, con un nivel de aprendizaje bajo y que requiere que los participantes respondan a todos los estímulos que se les presentan en la pantalla tan rápido como les sea posible (Dinges et al., 1997; Jewett et al., 1999). Sin embargo, tradicionalmente la vigilancia ha sido medida por medio de tareas de exactitud caracterizadas por la presentación de estímulos no objetivos presentados de forma frecuente entre estímulos objetivos presentados de forma infrecuente durante periodos de larga duración. Por esa razón, en el presente capítulo, fuimos un paso más allá diseñando el Experimento 4. En este Experimento investigamos el efecto del ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada en una tarea de atención sostenida tipo “oddball”. Utilizando este tipo de tarea cambiamos las demandas con respecto a la TVP. De hecho, la tarea tipo “oddball” incrementa la dificultad perceptiva (aquí se da más importancia a la exactitud que a la velocidad de respuesta), aumentan las demandas en términos de atención sostenida [menor probabilidad de aparición de estímulos objetivos (Parasuraman, 1987)] y disminuyen las demandas motoras con respecto a la TVP.

Algunos estudios previos han mostrado que la realización de ejercicio físico con una intensidad moderada mejora el desempeño en tareas tipo oddball (Kamijo et al., 2004; Nakamura et al., 1999). Estos estudios sugieren que la actividad física contribuye a una mayor facilitación de los mecanismos de inhibición lo que, a su vez, permitiría un procesamiento más eficaz de la información relevante para la tarea. Sin embargo, en los estudios mencionados, la tarea comportamental siempre se presentaba después de la

realización del ejercicio físico y no de manera concurrente a este. Dado que el momento temporal en el que se realiza la medición de los beneficios en las tareas de tipo cognitivo es de especial relevancia para el estudio de la vigilancia o atención sostenida (Krane & Williams, 2006), en el presente trabajo presentamos la tarea tipo oddball durante la fase de actividad física. Mediante esta manipulación, nuestro objetivo fue el de evaluar los posibles cambios en la discriminación perceptiva, mediante una tarea tipo oddball, de manera concurrente a la realización de la actividad física.

De manera más específica, el objetivo principal del Experimento 4 fue por tanto investigar si un esfuerzo físico aeróbico al 75% del UVA beneficiaba el rendimiento en atención sostenida y si este beneficio se mantenía a lo largo de una serie de 40' de duración. Para ello, veintidós mujeres sanas completaron una tarea de atención sostenida tipo “oddball” (.1 de probabilidad aparición del objetivo) durante 40' mientras pedaleaban bajo dos condiciones de esfuerzo (condición de esfuerzo-bajo, condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% de su UVA). Al igual que hicieron investigaciones previas (Correa et al., 2014; Lara et al., 2014), utilizamos la TVP durante 5' (Pre-Post) para obtener el nivel general de activación/vigilancia de antes y después de la sesión experimental.

De acuerdo con la investigación previa realizada, esperábamos que el esfuerzo ligero-moderado influyera en la ejecución de la tarea oddball, resultando en una mayor exactitud (tanto en los estímulos objetivos como en los estímulos no objetivos) durante el esfuerzo ligero-moderado con respecto al esfuerzo-bajo. Además, esperamos encontrar un decremento, en los mismos datos de exactitud, con el paso del tiempo en ambas condiciones de esfuerzo. En base a los resultados encontrados en nuestro Experimento 3, esperamos un incremento con el paso del tiempo en los TRs para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo en ambas condiciones de esfuerzo así como TRs más rápidos en el esfuerzo ligero-moderado que en la condición de esfuerzo-bajo.

Método

Participantes

Veintidós mujeres sanas y estudiantes de la Facultad de Psicología (Universidad de Granada), participaron en este estudio a cambio de créditos docentes (ver Tabla 8).

Todas las participantes tenían visión normal y no poseían en su historial médico ningún tipo de deterioro neuropsicológico que pudiera afectar a los resultados del experimento. Todas las participantes leyeron y firmaron un consentimiento donde se les informaba de los posibles beneficios y riesgos del mismo. El nivel físico de las participantes fue considerado como “bajo-moderado” en base a los resultados obtenidos en el test incremental de esfuerzo y los percentiles establecidos por el ACSM, (2010). El estudio se realizó de acuerdo a las guías éticas de investigación humana de la Universidad de Granada y bajo las normas establecidas en Declaración de Helsinki de 1964.

Tabla 8. Características antropométricas y fisiológicas de las participantes (media \pm DT).

Características antropométricas		
Tamaño de la muestra	22	
Edad (años)	21.18 \pm 2.17	
Altura (cm)	166.31 \pm 3.66	
Peso (kg)	59.82 \pm 8.58	
Parámetros fisiológicos en el test incremental submáximo		
Potencia máxima (W)	72.72 \pm 16.07	
Potencia relativa (W/kg)	1.23 \pm 0.29	
UVA (ml/kg/min)	18.45 \pm 3.80	
Parámetros fisiológicos en esfuerzo para la condición de momento en ejercicio		
	FC (lpm)	PSE
Condición de esfuerzo-bajo	93 \pm 8	8.56 \pm 1.55
Condición de esfuerzo ligero-moderado	113 \pm 7	12.56 \pm 1.93

Equipamiento y materiales

Todo fue igual que en los Experimentos 2 y 3, excepto por el PC Intel Quad Core I7, 3770 con un monitor LED de 24’’ BENQ XL 2411Z que utilizamos para presentar los estímulos de la TVP y de la tarea Oddball.

Tareas comportamentales

Tarea de Vigilancia Psicomotora: La TVP se realizó durante 5 minutos y nos proporcionó una medida general del nivel de activación/vigilancia de las participantes antes y después de la sesión experimental (Dinges et al., 1985; Loh et al., 2004). El número exacto de ensayos de cada participante dependió de la latencia de respuesta del individuo (para más información sobre la TVP ver método del capítulo IV).

Tarea Oddball: La tarea visual oddball [modificada de la original de Ariga & Lleras (2011)] fue utilizada para medir la atención sostenida o vigilancia de las participantes. La tarea consistió en la presentación de un fondo negro con una línea vertical de color gris (1.31 cd/m²) en el centro de la pantalla. Un círculo de color rojo (punto de fijación) con un diámetro de 0.2°, era presentado continuamente en el centro de la pantalla. Antes del inicio de la tarea oddball en ambas sesiones experimentales, se proporcionó a las participantes instrucciones verbales y escritas, haciendo hincapié en que había que fijar la vista en el centro de la pantalla y que había que presionar el pulsador ante la aparición del estímulo objetivo (línea corta, 3.4°) y no responder cuando la línea fuera larga (4.5°). El estímulo objetivo se presentó pseudo-aleatoriamente en el 10% de los ensayos. En cada ensayo la duración de los estímulos fue de 153 ms seguido de un intervalo inter-estímulo variable (ISI) de 1353-2341 ms arrojando una tasa de 30 eventos por minuto (ver Figura 14). Las participantes realizaron 4 bloques continuos de 300 ensayos (10') para un total de 1200 ensayos (40'), sin ningún descanso. No se proporcionó feedback durante los bloques experimentales.

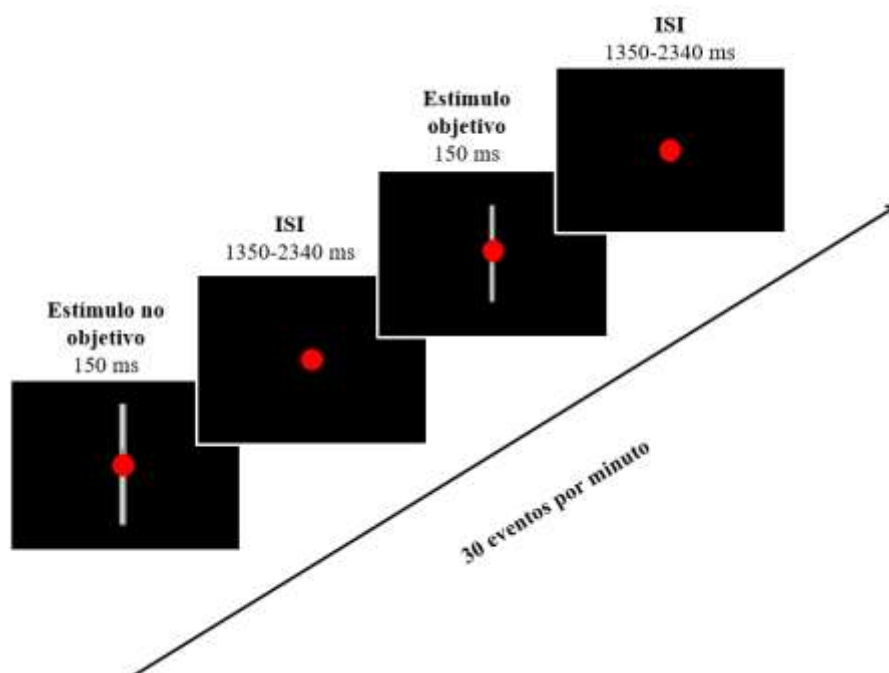


Figura 14. Secuencia de ensayos de la tarea de oddball.

Procedimiento

Las participantes completaron tres sesiones experimentales que realizaron en tres días diferentes (separados por un mínimo de 48 y un máximo de 96 horas). Las sesiones para cada participante se realizaban a la misma hora del día (entre las 9:30 am – 1:00 pm). El monitor de FC fue colocado alrededor del pecho de cada participante a su llegada al laboratorio. La FC fue recogida y grabada durante la totalidad de las tres sesiones experimentales.

En la primera sesión del presente estudio todo fue igual que en la primera sesión de los experimentos realizados en capítulos anteriores.

En la segunda y la tercera sesión, antes de comenzar las tareas comportamentales, las participantes respondieron a una serie de preguntas sobre la calidad/duración del sueño en la noche anterior y sobre el consumo de café u otras sustancias estimulantes que pudieran haber tomado antes de venir al laboratorio. Estas preguntas se realizaron para asegurar que las participantes venían en las condiciones de descanso deseables.

Previamente a la realización de la tarea oddball, las participantes completaron la TVP durante 5' (TVP-pre) sentadas en una silla confortable. Tras la realización de la TVP, completaron una versión corta de la tarea oddball (20 ensayos) con el fin de familiarizarse con ella. Posteriormente, las participantes se subieron al ciclo-ergómetro y tras 3 minutos de calentamiento completaron la tarea oddball durante 40' bajo dos condiciones de esfuerzo diferenciadas en intensidad [esfuerzo-bajo (intensidad muy baja) o esfuerzo ligero-moderado (75% del UVA)]. El orden de presentación de las dos condiciones fue contrabalanceado a través de los participantes. Para asegurarse de que la intensidad en la condición de esfuerzo fuera la deseada, se modificaba la resistencia del ciclo-ergómetro reduciendo o incrementando la carga de 1 en 1 W. Las participantes fueron instruidas para mantener una cadencia que oscilaba alrededor de los 55-60 rpm. El momento de inicio y del final de cada tarea cognitiva fue registrado para los análisis de FC. Tras finalizar la tarea oddball, las participantes bajaban del ciclo-ergómetro y se registró su PSE (ver tabla 8). Las participantes volvieron a completar la TVP durante 5' (TVP-post) en las mismas condiciones que en TVP-pre (Ver Figura 15).

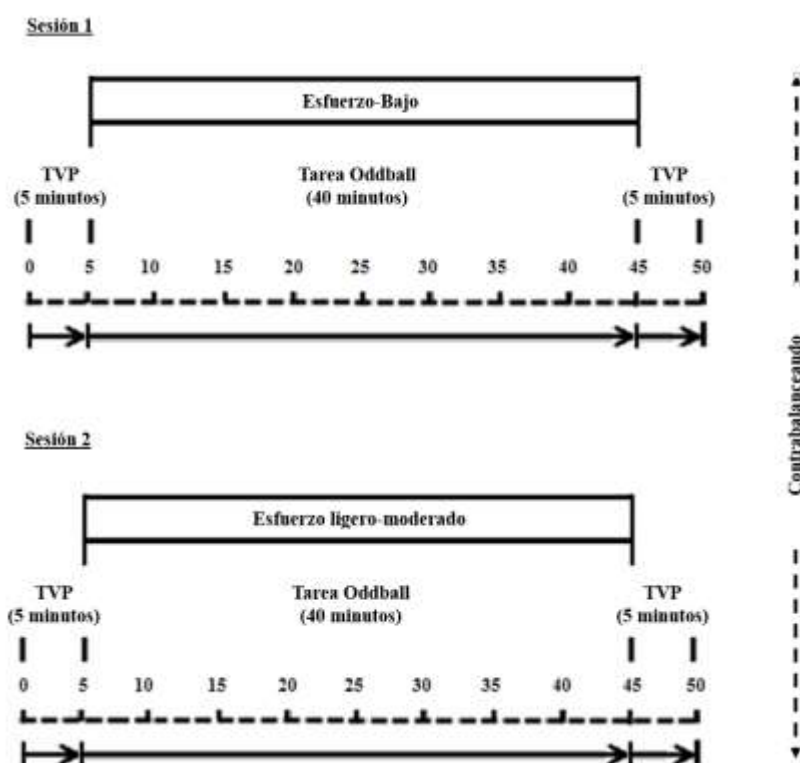


Figura 15. Representación esquemática de la sesión experimental (ver descripción completa en el texto).

Diseño y análisis estadísticos

Para la TVP, los datos de TR fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas con el factor condición de esfuerzo (esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero-moderado) y con el factor fase (TVP-Pre y TVP-Post). Los ensayos con TRs por debajo 100 ms (PVT-Pre = 2.37% y PVT-post = 2.56%) fueron asumidos como errores de anticipación y fueron descartados del análisis (Luque-Casado et al., 2016, a,b).

Para la tarea oddball, los datos de exactitud (porcentaje promedio de respuestas correctas) para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo, el estímulo no objetivo y los de TR para los ensayos con el estímulo objetivo fueron analizados mediante ANOVA de medidas repetidas con el factor condición de esfuerzo (esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero-moderado) y tiempo-en-tarea [4 bloques de 10' (primer bloque: 1' al 10'; segundo bloque: 11' al 20'; tercer bloque: 21' al 30' y bloque 4: 31' al 40)]. La tarea fue dividida en bloques para poder investigar los decrementos de atención sostenida.

Teniendo en cuenta que cuando se evalúa la exactitud de respuesta existe un límite superior (100%) de ejecución y que en nuestro Experimento la ejecución promedio de los participantes, al menos para la exactitud al estímulo no objetivo, estaba próxima a ese límite superior (pequeñas diferencias en exactitud pueden llegar a ser estadísticamente significativas simplemente debido a la baja variabilidad en las puntuaciones y no a una diferencia real de ejecución en esas condiciones), decidimos transformar los datos de exactitud a Arcoseno (porcentaje promedio de respuestas correctas) para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo y el estímulo no objetivo. De esta forma se elimina el límite superior en la ejecución, evitando en gran medida la comisión de errores tipo I (i.e., considerar una diferencia de medias como significativa cuando realmente no lo es).

Para el ANOVA con los TRs, los ensayos con TRs por debajo 100 ms (esfuerzo ligero-moderado = 0.54% y esfuerzo bajo = 0.24%) fueron asumidos como errores de anticipación y fueron descartados del análisis.

Se usó una prueba t de student para analizar los datos de PSE y de FC registrados durante el experimento. El tamaño del efecto se indica con la d de Cohen para la prueba t y el parcial eta squared para las Fs.

Resultados

Parámetros fisiológicos

PSE: Una prueba t comparando la PSE media de los participantes tras la realización de ambas condiciones (esfuerzo-bajo: 8.56 ± 1.55 ; esfuerzo ligero-moderado: 12.56 ± 1.93 lpm), confirmó que el esfuerzo percibido fue significativamente menor después de la realización de la condición a esfuerzo-bajo con respecto a la realización de la condición a esfuerzo ligero-moderado, $t(21) = -8.77$, $p < .01$, $d = 2.28$.

Frecuencia Cardíaca (FC): Una prueba t comparando la FC media de los participantes durante las condiciones de esfuerzo (esfuerzo-bajo: 93 ± 8 lpm; condición esfuerzo ligero-moderado: 113 ± 7 lpm) confirmó que la FC fue significativamente menor durante la realización de la condición a esfuerzo-bajo que durante la realización de la condición a esfuerzo ligero-moderado, $t(21) = -8.18$, $p < .001$, $d = -2.43$.

Los anteriores resultados confirmaron que las condiciones de esfuerzo (ligero-moderado y esfuerzo-bajo) fueron diferentes en términos de demanda física.

Comportamentales

Tarea de Vigilancia Psicomotora (TVP)

Un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA) con la media de los TR de las participantes (nótese que no se registró la TVP en la fase post de 2 participantes por lo que se presentan los datos de 20 participantes), reveló un efecto principal significativo de fase, $F(1,19) = 6.39$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partial}} = .25$. Como se representa en la Figura 16, las participantes respondieron más rápido en la fase previa a la sesión experimental (372.03 ± 55.63) que en la fase posterior a la sesión experimental (388.80 ± 66.49). Ni el efecto principal de esfuerzo, $F(1,19) = 2.91$, $p < .10$, $\eta^2_{\text{partial}} = .13$, ni la interacción entre los factores fase y esfuerzo, $F < 1$, resultaron significativos.

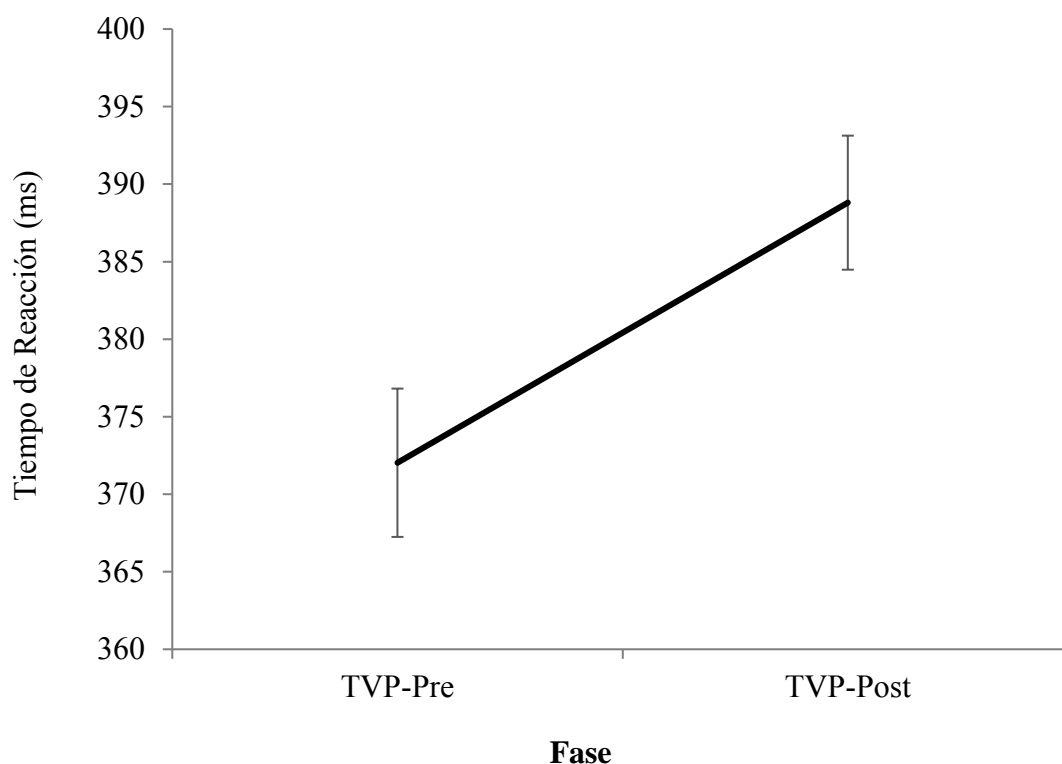


Figura 16. Tiempos de reacción de las participantes en función del factor fase (media \pm EE) en la TVP.

Tarea Oddball

Un ANOVA de medidas repetidas con el promedio del porcentaje de respuestas correctas al estímulo objetivo de las participantes transformado a arcoseno, mostró un efecto principal de tiempo-en-tarea, $F(3,63)=10.93$, $p<.001$, $\eta^2_{\text{partial}}=.34$, mostrando un decremento en exactitud con el paso del tiempo. Ni el efecto principal de esfuerzo, $F(1,21)=1.04$, $p<.31$, $\eta^2_{\text{partial}}=.04$, ni la interacción entre los factores esfuerzo y tiempo-en-tarea, $F(3,63)=1.68$, $p<.17$, $\eta^2_{\text{partial}}=.07$, resultaron significativos.

Otro ANOVA de medidas repetidas con el promedio del porcentaje de respuestas correctas al estímulo no objetivo de las participantes transformado a arcoseno, reveló un efecto principal significativo de tiempo-en-tarea, $F(3,63)=3.17$, $p<.03$, $\eta^2=.13$, reflejando un empeoramiento en exactitud con el paso del tiempo. Ni el efecto principal de esfuerzo, $F<1$, ni la interacción entre los factores esfuerzo y tiempo-en-tarea, $F<1$, fueron significativos (Ver tabla 9).

Tabla 9. Porcentaje promedio de respuestas correctas de las participantes en función del tiempo-en-tarea para cada una de las condiciones de esfuerzo (media \pm DT).

Exactitud a los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo				
Condición de esfuerzo	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
Esfuerzo-bajo	0.85 \pm 0.14	0.75 \pm 0.19	0,73 \pm 0.17	0.72 \pm 0.17
Esfuerzo ligero-moderado	0.82 \pm 0.17	0.79 \pm 0.18	0.79 \pm 0.17	0.74 \pm 0.19
Exactitud a los ensayos en los que aparecía el estímulos no objetivos				
Condición de esfuerzo				
Esfuerzo-bajo	0.96 \pm 0.05	0.97 \pm 0.04	0.97 \pm 0.04	0.96 \pm 0.06
Esfuerzo ligero-moderado	0.96 \pm 0.05	0.97 \pm 0.06	0.96 \pm 0.07	0.96 \pm 0.07

Un ANOVA de medidas repetidas con la media RT para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo, reveló un efecto principal de tiempo-en-tarea, $F(3,63)=25.66$, $p<.001$, $\eta^2 =.55$, mostrando un incremento de los TR con el transcurso del tiempo (Ver Figura 17). Se dieron TRs más bajos en la condición de esfuerzo ligero-moderado (450.83 ± 99.61) con respecto al esfuerzo-bajo (473.18 ± 106.10), aunque el efecto principal de condición de esfuerzo no alcanzó la significación estadística, $F(1,21)=3,47$, $p<.076$, $\eta^2 =.14$. La interacción entre los factores esfuerzo y bloque tampoco fue significativa, $F<1$.

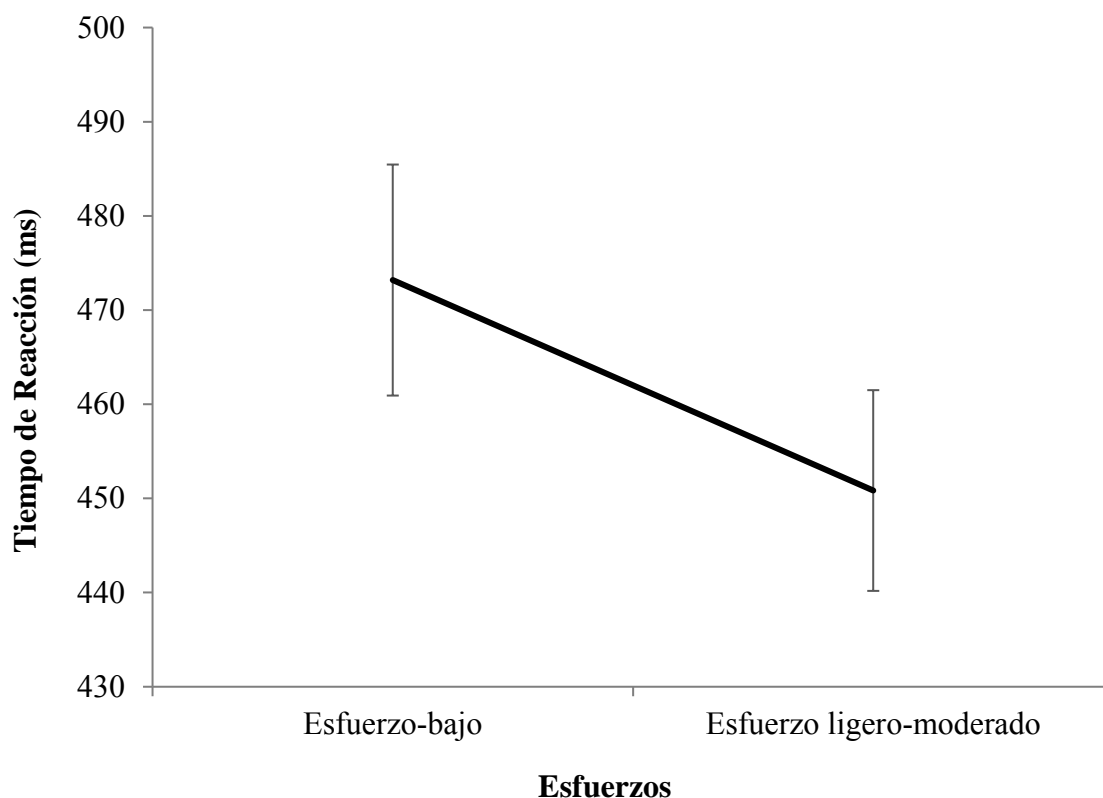


Figura 17. Media de tiempo de reacción para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo en función del esfuerzo (media \pm SE).

Discusión

En el presente capítulo, realizamos un estudio que investigó los efectos de un esfuerzo físico puntual a intensidad ligera-moderada sobre una tarea de atención sostenida tipo “oddball” en la que los participantes debían responder de forma precisa a estímulos relevantes poco frecuentes entre estímulos irrelevantes frecuentes. Las participantes ejecutaron una tarea de discriminación perceptiva tipo “oddball” mientras pedaleaban en un cicloergómetro bajo dos condiciones experimentales diferenciadas en intensidad del ejercicio (esfuerzo-bajo y esfuerzo ligero moderado). Utilizamos una TVP de 5’ (Pre-Post) para obtener el nivel general de vigilancia de forma previa a la sesión experimental y posterior a la sesión experimental.

Los resultados de la TVP mostraron que las participantes respondieron más rápido en la TVP-pre que en la TVP-post, interpretándose este resultado como un decremento

de vigilancia en la TVP-post respecto a la TVP-pre. Este hallazgo replica investigaciones previas que muestran que la TVP es una herramienta fiable y altamente sensible a los decrementos de vigilancia (Correa et al., 2014; Lara et al., 2014).

Los resultados de exactitud de las participantes, tanto para los estímulos objetivos como para los estímulos no objetivos, mostraron un empeoramiento con el paso del tiempo. Este resultado apunta a un decremento en atención sostenida con el transcurso de la tiempo-en-tarea. Por otro lado, aunque la tarea oddball utilizada aquí daba más importancia a la exactitud que a la velocidad de respuesta, el análisis de la media de los TRs para los ensayos en los que aparecía el estímulo objetivo nos reveló TRs más rápidos en esfuerzo ligero-moderado con respecto al esfuerzo-bajo, aunque este efecto no alcanzó la significación estadística. Además, encontramos un efecto principal de bloque que mostraba un incremento de los TRs en la respuesta a los estímulos objetivos con el paso del tiempo que confirmaba que había un decremento de atención sostenida a lo largo de la tarea. Estos hallazgos van en consonancia con los resultados encontrados en los Experimentos 1-3 del capítulo anterior y que confirmaron que el rendimiento en vigilancia depende de la intensidad del ejercicio con un punto “óptimo” que oscila entre el 75-80% del UVA y que el efecto de esta intensidad “óptima” se mantiene constante en el tiempo, al menos durante 45’. Por lo tanto, el Experimento 4 extiende la literatura previa que ha mostrado que la realización de ejercicio físico moderado produce un efecto facilitador, reflejado en TRs más bajos, en el rendimiento cognitivo (Arcelin, Delignieres & Briswalter 1998; Davranche & Audiffren 2004; Delignieres, Briswalter & Legros, 1994; Grego et al., 2004; McMorris & Graydon, 1997).

Los hallazgos del Experimento 4, aunque no concluyentes, parecen apuntar a que el esfuerzo ligero-moderado realizado de forma concurrente a una tarea de atención sostenida tipo “oddball” mejoraba la velocidad de respuesta pero no la exactitud. De hecho, esta dirección del efecto nos lleva a pensar que se han replicado los Experimentos 2-3 de esta tesis doctoral, debido a que la exigencia de la tarea no demandaba velocidad en la respuesta y aun así, nosotros encontramos ese efecto. Por lo tanto, los anteriores resultados apuntan a una disociación entre ambas medidas comportamentales y sugieren que las mejoras encontradas (TRs más bajos) inducidas por el esfuerzo ligero-moderado, podrían estar relacionadas con la mayor eficiencia de la atención sostenida (Drummond et al., 2015).

En resumen, en su conjunto, los resultados de los Experimentos 1-4 sugieren que el esfuerzo ligero-moderado mejora la velocidad de respuesta en tareas con demandas de atención sostenida con independencia de la relevancia del estímulo objetivo y contribuyendo a focalizar eficientemente la atención para optimizar el rendimiento. Esto nos lleva a pensar que la realización de un esfuerzo ligero-moderado mejora la capacidad de mantener la atención focalizada.

CAPÍTULO VI

Experimento 5: Efectos de una intervención de diez semanas de actividad física en la vigilancia y el control inhibitorio

Resumen

En el presente capítulo se presenta un experimento exploratorio en el que analizamos los efectos de un programa de entrenamiento físico (ejercicio físico regular) de diez semanas de duración sobre las características antropométricas (peso e IMC), los parámetros fisiológicos (UVA, potencia máxima y potencia relativa) y sobre dos tareas atencionales: 1) SART y 2) TTRS. Las participantes ejecutaron ambas tareas en dos fases diferentes (pre intervención y post intervención). La intervención demostró su eficacia a nivel físico ya que mejoraron significativamente las características antropométricas y los parámetros fisiológicos de las participantes. Sin embargo, estas mejoras a nivel físico no tuvieron un reflejo en el rendimiento en las tareas cognitivas. Por tanto, los resultados no fueron coincidentes con la mayor parte de investigaciones encontradas en la literatura sobre ejercicio físico regular a intensidades aeróbicas moderadas y efectos positivos sobre las funciones cognitivas. Los resultados se discuten en el marco de la literatura sobre esta temática, teniendo en cuenta además las limitaciones propias de este estudio exploratorio.

Introducción

Los efectos del ejercicio físico sobre el funcionamiento cognitivo pueden analizarse de dos modos distintos en función del tiempo de aplicación sobre el participante. En primer lugar, tenemos los efectos inducidos por el ejercicio físico puntual, ejercicio aplicado en un momento determinado sobre el participante. Estos efectos inducidos tienen carácter reversible (temporal) a corto plazo en el sistema cognitivo (ver McMorris, Tomporowski & Audiffren 2009; Tomporowski, 2009 para una revisión). En segundo lugar, tendríamos los efectos provocados por el ejercicio físico de forma crónica, ejercicio aplicado a lo largo del tiempo de forma regular, y que suelen tener carácter perdurable, sólido y duradero sobre las diferentes estructuras y funciones cerebrales (Colcombe & Kramer, 2003; Erickson et al., 2011). Mientras que en los anteriores capítulos de la presente tesis (capítulo IV, V y VI), hemos hecho referencia a los efectos del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo y cómo estos pueden afectar de forma distinta a los participantes en función de la intensidad del ejercicio, la duración o las demandas implicadas en la tarea que se realice, en el presente capítulo queremos seguir investigando y hacer referencia a los efectos de la práctica regular de actividad física sobre el funcionamiento cognitivo.

Este capítulo tiene como objetivo principal analizar los efectos de un programa de entrenamiento físico de diez semanas en una población de 33 mujeres jóvenes sanas. Con el fin de valorar la intervención, realizamos dos mediciones a nuestras participantes: 1) antes de comenzar con la intervención de actividad física (pre) y 2) después de la intervención (post). Tras estas mediciones (pre-post), se recogieron datos antropométricos y fisiológicos. Además, se completaron dos tareas cognitivas: 1) una SART y 2) una TTRS.

El ejercicio físico crónico ha estado tradicionalmente relacionado con diferentes tipos de beneficios en el rendimiento cognitivo. Basándonos en las evidencias encontradas en la literatura, podemos encontrar dos tipos de beneficios: 1) generales: los procesos cognitivos parecen verse beneficiados de la práctica de ejercicio físico y 2) específicos: efectos sobre algunos procesos cognitivos, por ejemplo sobre la inhibición de respuestas automáticas o detección de errores (ver Guiney & Machado, 2013; Smith et al., 2010). De hecho, el ejercicio físico crónico ha mostrado un efecto positivo, sobre todo a intensidades aeróbicas moderadas [del 40% al 80% del Volumen de Oxígeno

Máximo ($VO_{2m\acute{a}x}$)] sobre las funciones cognitivas (ver revisiones de Etnier et al., 2006; Hillman et al., 2008). Teniendo en cuenta que nuestro entrenamiento físico está basado en la intensidades aeróbicas moderadas que proponen estudios previos, esperamos que nuestras participantes mejoren tras la intervención, reduciendo los TRs en la TTRS y mejorando el control inhibitorio y la atención sostenida en la SART, reflejando esta mejora en TRs más reducidos y mayor inhibición de respuesta (mayor exactitud) en el post. Además, tras las 10 semanas de entrenamiento esperamos encontrar una disminución en las características antropométricas, reflejado en una pérdida de peso y bajada del IMC. También, esperamos un aumento en todos los parámetros fisiológicos de los que tomamos medidas (potencia máxima, potencia relativa y UVA).

Método

Participantes

Treinta y nueve mujeres sanas y estudiantes de la Facultad de Psicología (Universidad de Granada, España), participaron en este estudio a cambios de créditos por su colaboración (Ver Tabla 10 para obtener información descriptiva). Una característica presente en este tipo de estudios longitudinales es el abandono, ya que surgen diferentes problemas personales o de otra índole en los participantes. En nuestro estudio, seis participantes abandonaron el programa [incapacidad para realizar el entrenamiento ($n=3$); lesión ($n=1$); falta de voluntad ($n=2$)] y sólo realizaron la sesión previa a la intervención, no completando la totalidad del experimento. No todos completaron el mismo número de sesiones de entrenamiento (más información en el procedimiento). El porcentaje de adhesión de las participantes que tomaron parte del estudio y completaron ambas evaluaciones fue del 84.61% ($n=33$).

Antes de empezar con la intervención, todas las participantes completaron un cuestionario general de hábitos de vida saludables y el cuestionario internacional de actividad física en versión corta (IPAQ-SF; Lee et al., 2011). En el primero, se les preguntaba sobre datos antropométricos (altura y peso), hábitos deportivos actuales, adicciones y enfermedades que pudieran impedir la práctica de ejercicio físico, mientras que en el segundo, podíamos observar el nivel de actividad física de los participantes. Los datos del cuestionario y las preguntas sobre hábitos de vida de los participantes nos

mostraron el nivel de sedentarismo de los participantes [niveles de actividad física “bajo-moderado” (Mets= 629.55 ± 406.40)] y que estos no tenían ninguna lesión parcial/crónica, ni sufrían ningún trastorno neurológico que pudiera afectar a los resultados del experimento. Tras la selección de la muestra, todas las participantes leyeron y firmaron un consentimiento donde se les informaba de los posibles beneficios y riesgos del mismo (ver Tabla 10). El estudio fue aprobado por el comité de ética de investigación humana de la Universidad de Granada.

Tabla 10. Características antropométricas y fisiológicas de las participantes (media \pm DE).

Características antropométricas		
Tamaño de la muestra	33	
Edad (años)	20.07 ± 2.05	
Altura (cm)	164.63 ± 5.61	
	Antes de la Intervención	Después de la intervención
Peso (kg)	60.62 ± 8.23	59.33 ± 8.08
Índice de Masa Corporal (IMC)	22.35 ± 2.55	21.85 ± 2.38
Parámetros fisiológicos en el test incremental submáximo		
	Antes de la Intervención	Después de la intervención
Potencia máxima (W)	90.15 ± 21.34	99.85 ± 22.34
Potencia relativa (W/kg)	1.48 ± 0.24	1.67 ± 0.25
UVA (ml/kg/min)	20.56 ± 3.61	23.87 ± 3.80

Equipamiento y materiales

Todo fue igual que en el Experimento 4.

Tareas comportamentales

SART: Esta tarea de tipo go/no-go, desarrollada por Robertson et al., 1997, requiere que los participantes respondan lo más rápidamente posible a un solo dígito presentado aleatoriamente entre el 1 y 9 (ensayos go), excepto cuando el dígito es el 3, al que no deben responder (ensayos no-go). Los estímulos aparecían en color gris sobre un

fondo negro en el centro de la pantalla del ordenador en uno de los cuatro posibles tamaños de fuente (24, 72, 120 y 175, Times New Roman) que cambió aleatoriamente en cada ensayo. El dígito aparecía en la pantalla durante 200 ms y a continuación una pantalla en negro que permanecía durante 600 ms o hasta la respuesta del participante. Si no se daba ninguna respuesta dentro de los 800 ms aparecía como feedback una máscara roja (rectángulo) durante 100 ms que mostraba que el participante cometió un error (en los ensayos go). Posteriormente, el siguiente ensayo comenzó. La tarea estaba compuesta por 1080 ensayos (Go= 960 y no go = 120), con una proporción de no-go del 0.11 (Figura 18). Las participantes realizaron la tarea durante 17' aproximadamente.

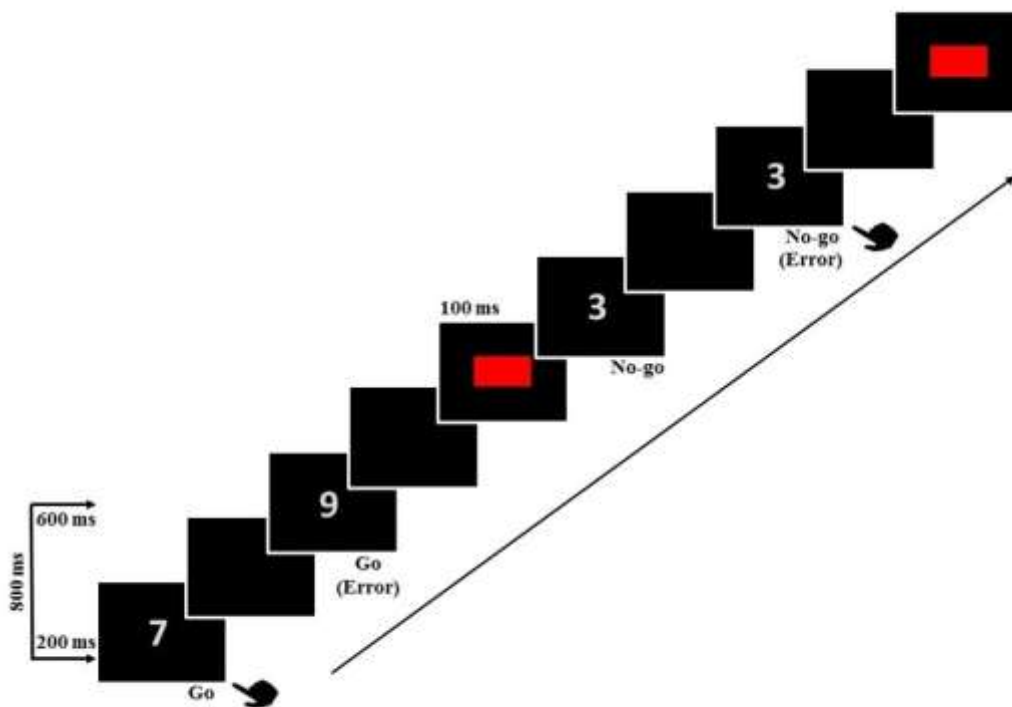


Figura 18. Secuencia de eventos para la SART

Tarea de Tiempo de Reacción simple

Se utilizó una versión modificada de la SART. En concreto, se modificaban las instrucciones y se instruía a los participantes en que respondieran lo más rápidamente posible a todos los dígitos, incluido el número 3. Los estímulos y feedback fueron igual

a los de la tarea anteriormente mencionada (Figura 19). Sin embargo, el feedback apareció cuando no daban respuesta a cualquier dígito. La tarea estaba compuesta por 1080 ensayos.

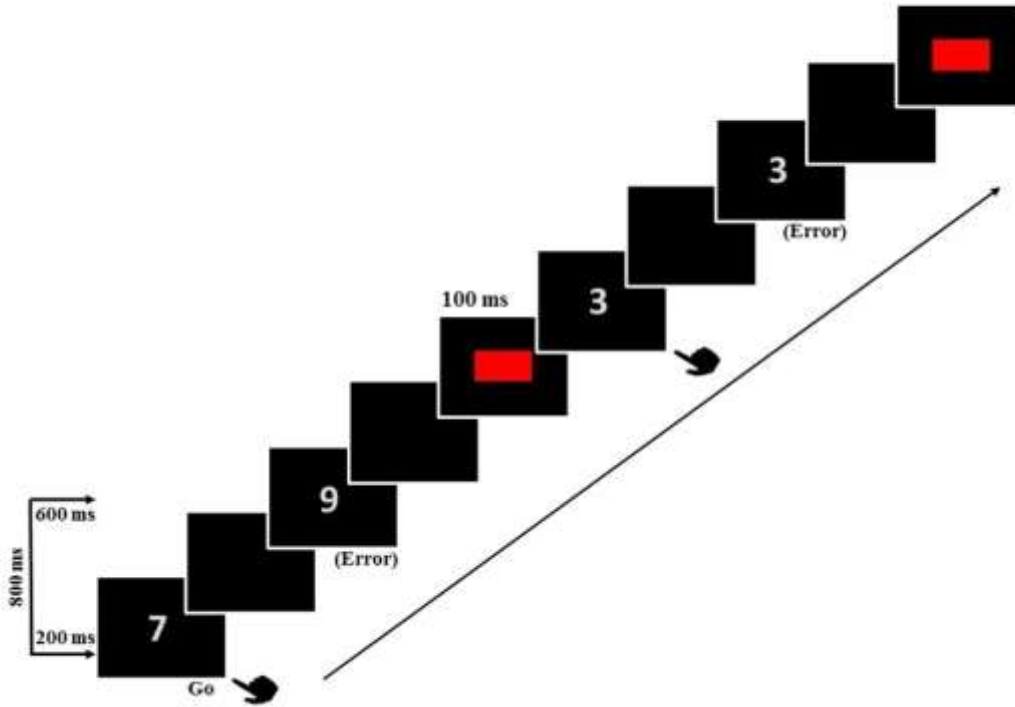


Figura 19. Secuencia de eventos para la TTRS.

Procedimiento

Sesión previa a la intervención.

Las participantes seleccionadas visitaron el laboratorio y fueron evaluadas en una sesión de aproximadamente 2 horas de duración. Fueron evaluadas entre las 9:30 am – 5:00 pm y se controlaron las condiciones ambientales (espacio, temperatura y humedad). Las evaluaciones se realizaron 48 horas antes de empezar la intervención de 10 semanas.

En la sesión previa a la intervención, inmediatamente a la llegada de los participantes al laboratorio, se les colocaba la banda de registro del pulsómetro para monitorizar la FC durante la totalidad de la sesión experimental. Las participantes confortablemente sentadas, completaron una versión corta de 108 ensayos go para la TTRS y 108 ensayos (Go= 96 y no go= 12) para la SART. Posteriormente, las

participantes realizaron las anteriores tareas en orden contrabalanceado con una duración de 17' cada una (Figura 20).



Figura 20. Distribución de los aparatos e instrumentos empleados durante la realización de las tareas comportamentales.

Tras finalizar las tareas comportamentales, las participantes realizaron un test de esfuerzo incremental submáximo en cicloergómetro (igual que el descrito en los capítulos IV y V de esta tesis). A continuación del test incremental submáximo, se dejaba aproximadamente unos 5' a las participantes para refrescarse, cambiarse y otras necesidades. Tras este receso, el experimentador se reunía de nuevo con cada una de las participantes aproximadamente durante 30' para explicar correctamente cómo se realizaba el programa de entrenamiento. Para ello, el experimentador dio una serie de pautas para su realización (temporalización, volumen e intensidad de las sesiones, escala de percepción subjetiva del esfuerzo, etc.) y les proporcionó acceso a una hoja de registro

individual en la aplicación de Google Drive. En esta hoja las participantes completaban su percepción subjetiva de esfuerzo de la sesión y las sensaciones o problemas que podían tener en cada uno de los entrenamientos.

Intervención.

Las participantes completaron un programa de entrenamiento aeróbico de 10 semanas de duración basado en la carrera. El programa de entrenamiento (ver Figura 21) estaba supervisado por el experimentador y fue diseñado individualmente, para cada una de las participantes, teniendo en cuenta las características físicas individuales de estas. Dicho programa de actividad física cumplía con las recomendaciones del ACSM (2010), ya que este tenía una frecuencia semanal de entrenamiento de 3 sesiones de 1 hora por semana y se desarrolló a lo largo de 10 semanas (entre los meses de marzo y mayo). De las 30 sesiones que debían realizar los participantes, la media de sesiones que realmente realizaron fue de 26.91 ± 4.22 . Las sesiones de entrenamiento fueron divididas en tres fases: 1) calentamiento (10'), 2) desarrollo general [actividad aeróbica basada en la carrera (45')] y 3) la vuelta a la calma (5'). La media de intensidad de las sesiones fue de un nivel duro (15.84 ± 1.22) según la escala de Borg.

Para controlar que las participantes realizaban el programa de entrenamiento, el investigador utilizó de forma diaria la aplicación de Google Drive. En ella, el experimentador observaba la evolución personal de las participantes. Además, al final de cada semana de entrenamiento se realizaba una llamada para controlar que la intervención se estaba cumpliendo correctamente.

Sesión posterior a la intervención.

Todas las participantes que finalizaron la intervención visitaron el laboratorio y fueron evaluados a la misma hora del día que en la sesión previa a la intervención (entre las 9:30 am - 5:00 pm) y con exactamente las mismas condiciones ambientales (espacio, temperatura y humedad). La evaluación posterior a la intervención se realizó 48 horas después del último entrenamiento de la intervención de 10 semanas. Todo fue igual que en la sesión previa a la intervención excepto por el hecho de que los cuestionarios no se completaban en la post intervención.

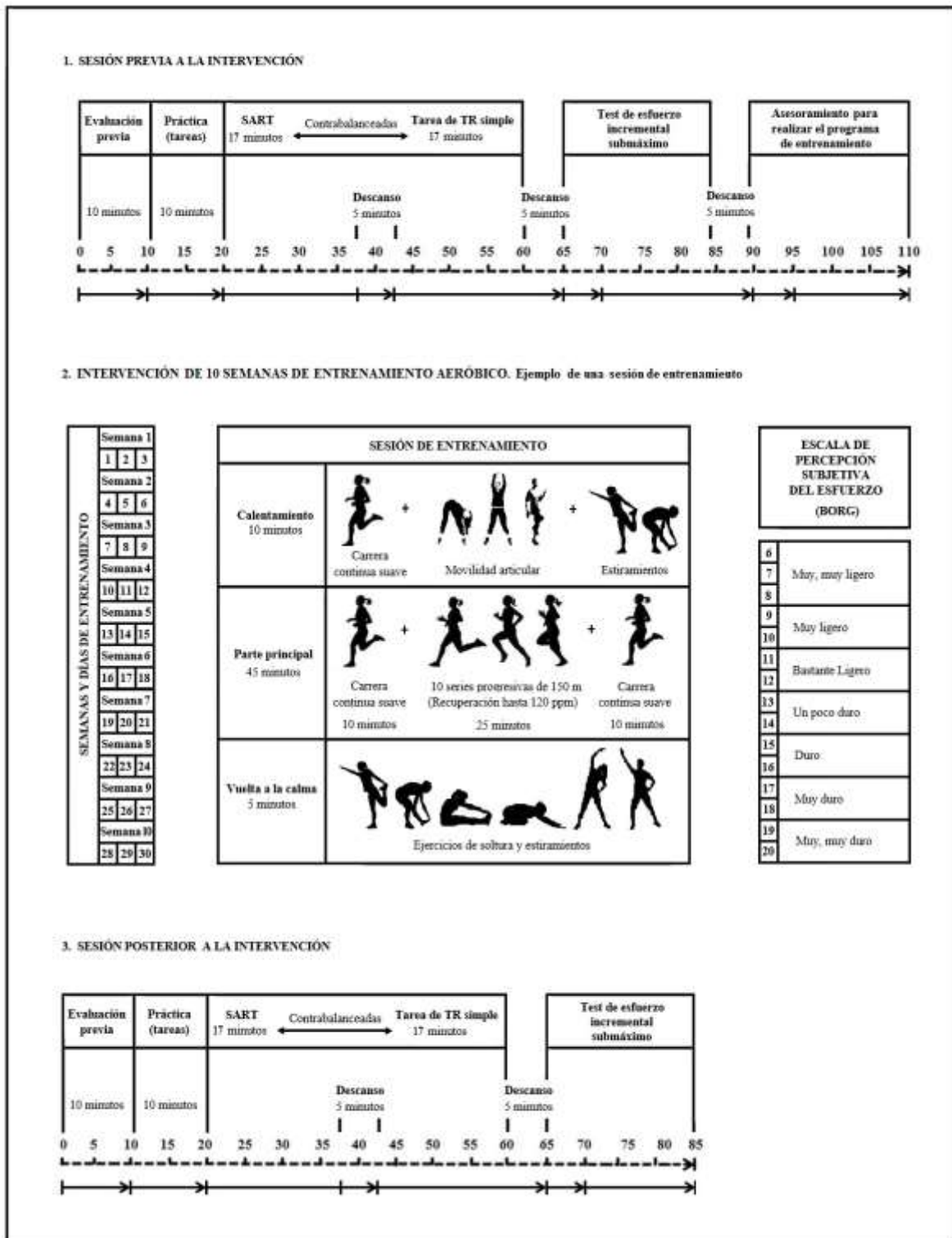


Figura 21. Representación esquemática del procedimiento llevado a cabo para completar la totalidad del estudio (ver descripción completa en el texto).

Análisis estadísticos

Para la SART, los datos de exactitud (porcentaje promedio de respuestas correctas) para los ensayos en los que aparecía el estímulo go, los ensayos en los que aparecía el estímulo no-go y para la exactitud global (ensayos go y no go) fueron analizados mediante análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas con el factor fase (pre y post) y el factor de tiempo-en-tarea [4 bloques (primer bloque: 1' al 4'; segundo bloque: 5' al 8'; tercer bloque: 9' al 12' y bloque 4: 12' al 17)]. También para la SART, los TRs fueron analizados mediante un ANOVA de medidas repetidas para los ensayos en los que aparecía el estímulo go con el factor fase (pre y post) y el factor de tiempo-en-tarea [4 bloques (primer bloque: 1' al 4'; segundo bloque: 5' al 8'; tercer bloque: 9' al 12' y bloque 4: 12' al 17)].

Para la TTRS, los TRs fueron analizados mediante un ANOVA de medidas repetidas con fase (pre y post) y el factor de tiempo-en-tarea [4 bloques (primer bloque: 1' al 4'; segundo bloque: 5' al 8'; tercer bloque: 9' al 12' y bloque 4: 12' al 17)]. La tarea fue dividida en bloques para poder investigar los decrementos de atención sostenida. Los ensayos con TRs por debajo 100 ms (pre = 15.33% y post = 14.20%) fueron asumidos como errores de anticipación y fueron descartados del análisis. Una prueba T de student fue utilizada para comparar las anticipaciones en la TTRS del pre y del post.

Una prueba T de student fue utilizada para comparar los datos antropométricos (peso e IMC) y los parámetros fisiológicos (potencia máxima, potencia relativa e UVA) del pre y el post registrados durante el experimento. El tamaño del efecto se indica con la d de Cohen para la prueba T y el parcial eta cuadrado para las Fs.

Realizamos cuatro análisis de correlación: 1) entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y los TRs de la TTRS (diferencia del promedio de TRs del pre y el promedio de TRs del post), 2) entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y los TRs para la SART (diferencia del promedio de TRs para los ensayos en los que aparecía el estímulo go en el pre y del promedio de TRS para los ensayos en los que aparecía el estímulo go en el post), 3) entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y los porcentajes de respuestas correctas a los estímulos go en la SART (diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo go

del pre) y 4) entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y los porcentajes de respuestas correctas a los estímulos no-go de la SART (diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo no-go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo no-go del pre). Todas las *ps* de las correlaciones fueron corregidas por la prueba Holm-Bonferroni para comparaciones múltiples.

Resultados

Características antropométricas

Peso: Una prueba t comparando los datos de peso del pre (60.62 ± 8.23) y del post (59.33 ± 8.15), mostró que el peso fue significativamente menor después de la intervención de 10 semanas, $t(32)=4,54$, $p<.001$, $d=0.15$.

IMC: Una prueba t comparando los datos de IMC del pre (22.34 ± 2.51) y del post (21.85 ± 2.38), confirmó que el IMC fue significativamente menor después de la intervención de 10 semanas, $t(32)=4,63$, $p<.001$, $d=0.20$.

Parámetros fisiológicos

Potencia Máxima: Una prueba t comparando los datos de la fase pre (90.15 ± 21.34) y post (99.85 ± 22.34), confirmó que los vatios máximos movilizados fueron significativamente mayores después de la intervención, $t(32)=-4,01$, $p<.001$, $d=0.44$

Potencia Relativa: Una prueba t comparando los datos de potencia relativa del pre (1.48 ± 0.24) y del post (1.67 ± 0.25), confirmó que los W/kg movilizados y la eficiencia mecánica post ejercicio fueron significativamente mayores después de la intervención, $t(32)=4,70$, $p<.001$, $d=-0.77$.

UVA: Una prueba t comparando el UVA del pre (20.56 ± 3.61) y el UVA del post (23.87 ± 3.80), confirmó que el volumen de oxígeno a umbral fue significativamente mayor después de la intervención, $t(32)=5,01$, $p<.001$, $d=-0.88$.

Tareas comportamentales

TTRS

Un ANOVA de medidas repetidas con la media de RT, no mostró significación estadística ni en el efecto principal de fase $F < 1$, ni en el efecto principal de tiempo-en-tarea, $F(3, 96) = 1.62$, $p < .18$, $\eta^2 = .04$, ni en la interacción entre los factores fase y tiempo-en-tarea, $F < 1$.

Una prueba t comparando el porcentaje de anticipaciones del pre (15.33 ± 7.91) y el post (14.20 ± 9.03), confirmó que no hubo diferencias significativas entre ambas fases, $t(32) = 0.83$, $p < .40$, $d = 0.13$.

SART

Un ANOVA de medidas repetidas con el promedio del porcentaje de respuestas correctas al estímulo go, no presentó significación estadística ni en el efecto principal de fase, $F(1,32) = 2.11$, $p < .15$, $\eta^2 = .06$, ni en el efecto de tiempo-en-tarea, $F < 1$, ni en la interacción entre los factores fase y tiempo en tarea, $F < 1$,

Otro ANOVA de medidas repetidas, pero en este caso con el promedio del porcentaje de respuestas correctas al estímulo no-go, no mostró significación estadística ni en el efecto principal de fase, $F(1,32) = 1.82$, $p = .18$, $\eta^2 = .05$, ni en la interacción entre los factores fase y tiempo en tarea, $F(3,96) = 1.26$, $p < .29$, $\eta^2 = .04$, ni en el efecto de tiempo-en-tarea, $F(3,96) = 2.27$, $p < .08$, $\eta^2 = .06$.

Un ANOVA de medidas repetidas con el promedio del porcentaje de respuestas correctas, tanto para los estímulos go como para los no-go (exactitud global), no reveló significación estadística ni en el efecto de tiempo-en-tarea, $F(3,96) = 1.33$, $p < .26$, $\eta^2 = .04$, ni en la interacción entre los factores fase y tiempo en tarea, $F < 1$. En términos globales los participantes mostraron mayor exactitud global en la fase post con respecto a la fase pre, aunque este efecto no fue significativo, $F(1,32) = 3.55$, $p < .07$, $\eta^2 = .10$.

Un ANOVA de medidas repetidas con la media RT para los ensayos en los que aparecía el estímulo go, no mostró ni un efecto principal de fase, $F < 1$, ni un efecto de

tiempo-en-tarea, $F < 1$, ni una interacción entre los factores fase y tiempo en tarea, $F(3,96) = 1.61$, $p < .18$, $\eta^2 = .04$.

Los resultados en términos de rendimiento físico (mayor diferencia en el promedio del UVA) tras la intervención de diez semanas de entrenamiento físico regular, mostraron que el diseño de nuestro entrenamiento, basado las recomendaciones del ACSM (ACSM, 2010), fue eficaz y que nuestra intervención funcionó correctamente. Sin embargo, nos preguntamos si realmente los efectos que esperábamos observar en la TTRS como en la SART podrían depender de la mejora relativa de cada uno de las participantes. Por lo tanto, intentando desentrañar esta pregunta hicimos cuatro análisis de correlación entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y el post-pre de las 4 variables de tarea: 1) TTRS; diferencia del promedio de TRs del pre y el promedio de TRs del post, 2) SART; diferencia del promedio de TRs del pre y el promedio de TRs del post, 3) SART; diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo go del pre y 4) SART; diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo no go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo no go del pre.

Análisis de correlación para la TTRS

TRs

La correlación entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y la diferencia del promedio de TRs del pre y el promedio de TRs del post, no mostró significación estadística ($r = .20$ y $p = .26$).

Análisis de correlación para la SART

TRs en la SART

La correlación entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y la diferencia del promedio de TRs del pre y el promedio de TRs del post, no mostró significación estadística ($r = .14$ y $p = .82$).

Ensayos Go

La correlación entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y la diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo go del pre, no mostró significación estadística ($r=.36$ y $p=.15$).

No-go

La correlación entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y la diferencia del promedio de porcentajes de respuestas correctas al estímulo No-go del post y el promedio de porcentaje de respuestas correctas al estímulo No-go del pre, no mostró significación estadística ($r=-.10$ y $p=.82$).

Discusión

En el presente capítulo, realizamos un estudio exploratorio que investigó los efectos de un programa de entrenamiento físico de diez semanas de duración en una población de 33 mujeres jóvenes sanas. Con el fin de valorar la intervención, realizamos dos mediciones (pre-post). Tras estas mediciones (pre-post), se recogieron datos sobre las características antropométricas (peso e IMC), parámetros fisiológicos (UVA, potencia máxima y potencia relativa) y sobre dos tareas atencionales: 1) SART Y 2) TTRS.

Los resultados tras diez semanas de entrenamiento mostraron una disminución estadísticamente significativa en las características antropométricas (peso e IMC), reflejando pérdidas de peso y bajadas de IMC tras la intervención. Además coincidiendo también con nuestras hipótesis previas, esperábamos un aumento significativo en todos los parámetros fisiológicos (potencia máxima, potencia relativa y UVA), algo que conseguimos también. Estos hallazgos nos proporcionan datos que afirman que nuestra intervención fue eficiente y mejoró de forma general a las participantes del presente experimento.

Los resultados en la TTRS y en la SART no mostraron ningún tipo de significación estadística. No obstante, viendo los resultados de nuestro experimento y tras

profundizar en los datos obtenidos, se pudo observar que las participantes poseían gran variabilidad en la ganancia física (mayor diferencia en el promedio del UVA) tras la intervención de diez semanas de entrenamiento. Por lo tanto, teniendo en cuenta todo lo precedente, nos planteamos si podría existir una correlación entre la ganancia física tras el entrenamiento y la ganancia cognitiva. Es decir, los que poseían mayor ganancia física tras la intervención eran los que más mejoraban en la TTRS y la SART. Así, para desentrañar la anterior cuestión se hicieron correlaciones entre la diferencia del promedio del UVA entre las sesiones post-pre y las 4 variables de tarea. No encontramos significación estadística en ninguna de las correlaciones planteadas. Téngase en cuenta que los resultados del Experimento 5 parecen ir en contra de los resultados que se han encontrado en la literatura y que sugieren una clara asociación positiva entre el ejercicio físico, el estado de forma física y el rendimiento cognitivo (Hillman, Erickson & Kramer, 2008, Vergurgh et al., 2013).

Relevantes aquí son las investigaciones que han aplicado una intervención de entrenamiento físico regular y que han encontrado una relación positiva entre el nivel de forma física adquirido con la intervención y el rendimiento cognitivo. (Hilman et al., 2014; Kamijo et al., 2011; Lakes & Hoyt, 2004; Predovan et al., 2012). Una de las principales consecuencias del ejercicio físico crónico son las adaptaciones fisiológicas a nivel cardiovascular (reflejadas en $V_{O2_{máx}}$) que influyen directamente con una buena condición física (Kenney y cols., 2013). La gran mayoría de estudios existentes en la literatura vinculan positivamente una buena capacidad cardiovascular con mejores rendimiento en tareas cognitivas en comparación con otros participantes con bajos niveles de condición física. Sin embargo, esta relación positiva entre el nivel de forma física y el rendimiento cognitivo ha sido observada sobre todo en niños (Castelli et al., 2007; Pontifex et al., 2012) y adultos mayores (Kramer et al., 1999; Renaud et al., 2010; Prakash et al., 2011). Dado que la muestra elegida de nuestro estudio es de adultos jóvenes, los resultados obtenidos podrían estar supeditados a la elección del grupo de intervención. Como bien hemos comentado anteriormente, la mayoría de estudios de intervención similares al aquí presentado, se han realizado en edades tempranas y en mayores. Aunque se han encontrado estudios experimentales con adultos jóvenes (Themanson, Pontifex & Hillman, 2008), las muestras experimentales con participantes adultos jóvenes son menos abundantes y los pocos estudios que conocemos muestran conclusiones generalmente

discordantes. La razón por la que pocos estudios abordan la relación entre el ejercicio físico y el rendimiento cognitivo durante este período de la vida, parece vincularse a que este grupo de edad se encuentra en un periodo de estabilidad cognitiva que suele estar relacionado con un pico de rendimiento en los procesos cognitivos en comparación con otros periodos de vida, principalmente edades tempranas y edades avanzadas (Salthouse & Davis, 2006). En este sentido, teniendo en cuenta que los individuos ubicados en estas franjas de edad se encuentran en un período de alta variabilidad interindividual, sería más sencillo que el ejercicio físico incrementara su impacto sobre su estructura y funciones cerebrales.

Limitaciones

Aunque las revisiones sistemáticas (Guiney & Machado, 2013) y meta-análisis; (Colcombe & Kramer, 2003; Smith et al., 2010) que estudian la influencia del ejercicio físico crónico sobre las funciones cognitivas sugieren una clara relación positiva entre ejercicio físico y rendimiento cognitivo, existen ciertas dudas acerca del tipo de entrenamiento (volumen, intensidad y duración de la intervención) y los beneficios en los que éste repercute a nivel cognitivo (Etnier et al., 2006). Sin embargo, en contraposición y apoyando los resultados de nuestro Experimento 5, diferentes meta-análisis no apoyan la hipótesis cardiovascular (Etnier et al., (1997, 2006), o encuentran pequeños efectos positivos en adultos mayores [en funciones cognitivas tales como atención visual y auditiva, la velocidad de procesamiento y la función motora (Angevaren et al., 2008)], en niños pre adolescentes y adolescentes [funcionamiento ejecutivo en niños (Verburgh et al., 2013)] o no encontraron evidencias de que el ejercicio aeróbico aumentara la condición física y por lo tanto, mejorará la función cognitiva en la población de personas mayores (Young et al., 2015).

Aquí, destacamos la validez de nuestro estudio, ya que el programa de entrenamiento estaba supervisado por el experimentador y fue diseñado individualmente (basado en las recomendaciones del ACSM) para cada una de las participantes, teniendo en cuenta las características físicas individuales de cada una de ellas. No obstante, procederemos a explicar las limitaciones de nuestro experimento, ya que pueden ayudar

a desentrañar futuras investigaciones sobre el ejercicio físico regular y los efectos positivos sobre las funciones cognitivas.

Una de las limitaciones más importante de nuestro Experimento 5 es la no presencia de grupo control. La falta de grupo control limitó la información que se puede extraer de nuestros datos y pone en duda los resultados encontrados en nuestro estudio. La duración de la intervención fue otras de las limitaciones de nuestro Experimento 5. La duración de la intervención diseñada pudo ser relativamente corta. La literatura ha utilizado intervenciones mucho más largas, al menos de 6 de meses (Castelli et al., 2007; Chaddock et al., 2012; Colcombe et al., 2004; Coubard et al., 2011; Monleón et al., 2015) y aunque 10 semanas han podido ser suficientes para observar efectos a nivel físico, pueden no serlo para tener efectos a nivel cognitivo, sobre todo en adultos jóvenes. Otra de las limitaciones de nuestro estudio es que los resultados podrían estar condicionados por la muestra no aleatoria que elegimos para el estudio. Es decir, se seleccionaron a todas las participantes voluntarias para realizar la investigación. Sin embargo, esto, en base a los resultados nulos obtenidos, no parece que haya sido una limitación ya que, aun teniendo una motivación especial por participar en el estudio, la intervención no influyó en los resultados de las tareas comportamentales, aunque relevantemente si en las características antropométricas y los parámetros fisiológicos.

Una limitación más fue que el entrenamiento se controló de forma virtual y no presencial. Es decir, aunque el experimentador controlaba virtualmente el entrenamiento y llamaba semanalmente a las participantes, podría haberse dado el caso de que el entrenamiento no se hubiera realizado correctamente. Incluso podría haberse dado la situación de que alguna participante nos engañara durante su participación. Aun así, de nuevo, destacar que hubo mejoras físicas significativas.

CAPÍTULO VII

Discusión General

7.1. Discusión General

Durante las últimas dos décadas, ha habido un interés creciente en la influencia del ejercicio físico puntual sobre las funciones cognitivas (ver revisiones de Lambourne & Tomporowski, 2010; McMorris et al., 2009; Tomporowski, 2003). De hecho, es importante comentar que se ha progresado hacia el entendimiento existente en este importante tópico de investigación (Grego et al., 2004; Pontifex & Hillman, 2007, 2008). En este sentido, diferentes meta-análisis han mostrado un efecto facilitador del ejercicio físico puntual sobre el funcionamiento cognitivo (Etnier et al., 1997; McMorris & Hale, 2012; McMorris & Graydon, 2000; Tomporowski, 2003; Vergurgh et al., 2013). No obstante, a pesar de los efectos encontrados y la relevancia que posee esta línea de investigación, existen gran diversidad de resultados que generan debate acerca de este objeto de estudio (Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010).

El objetivo principal de los Experimentos 1-3 fue demostrar que el rendimiento en vigilancia podría variar en función de la intensidad. En el Experimento 1, se midió el rendimiento de los participantes en una TVP durante una condición de ejercicio físico incremental (20' pedaleando al 40%, 60%, 80%, y 100% del UVA, manteniéndose 5' en cada una de las intensidades) comparándolo con otra condición de esfuerzo bajo (20' a una intensidad baja). El Experimento 2 se diseñó para dissociar el efecto de la intensidad del tiempo en tarea. Los participantes realizaron la TVP en cuatro sesiones: 5' al 40% del UVA, 5' al 60% del UVA, 5' al 80% del UVA y 5' al 100% del UVA. En el Experimento 3, se volvió a evaluar de nuevo con la TVP aunque en esta ocasión con una versión de 45' en una condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% del UVA y se comparó con una condición de esfuerzo-bajo (control). En conjunto, los resultados de los Experimentos 1-3 demostraron que el estado de vigilancia se ve afectado durante el ejercicio y que la intensidad del ejercicio determina el rendimiento en una tarea de vigilancia con altas demandas atencionales. Estos hallazgos nos ayudaron a extender la literatura previa sobre este importante tema de investigación que interrelaciona la cognición durante el ejercicio con la vigilancia o atención sostenida.

El objetivo principal del Experimento 4 fue el de investigar si un esfuerzo físico aeróbico al 75% del UVA beneficiaba el rendimiento en vigilancia y si este beneficio se mantenía a lo largo de una serie de 40' de duración. Para ello, veintidós mujeres sanas

completaron una tarea de atención sostenida tipo “oddball” (.1 de probabilidad aparición del objetivo) durante 40’ mientras pedaleaban bajo dos condiciones de esfuerzo (condición de esfuerzo-bajo, condición de esfuerzo ligero-moderado al 75% de su UVA). Utilizamos la TVP durante 5’ (Pre-Post) para obtener el nivel general de activación/vigilancia de antes y después de la sesión experimental. Con respecto a los Experimentos 1-3, modificamos la tarea aplicada lo que supone un cambio en las demandas atencionales que se requerían en las anteriores investigaciones. Es decir, se consigue crear mayores dificultades perceptivas que incrementan las demandas en vigilancia. Además, este cuarto estudio hizo posible evaluar los posibles cambios en discriminación perceptiva durante la realización de un ejercicio físico puntual, algo que la TVP (utilizada en los Experimentos 1-3) no nos permitía investigar. En definitiva, los resultados del Experimento 4 sugieren que el ejercicio ligero-moderado realizado de forma concurrente a una tarea de atención sostenida tipo “oddball” indujo una activación general en los participantes que provocó una tendencia a mejorar los TRs a lo largo de toda la tarea las respuestas ante estímulos impredecibles sin afectar a la exactitud en la respuesta. Esta dirección del efecto parece replicar de resultados de los Experimentos 1-3, aun cuando las demandas de la tarea de vigilancia tipo “oddball” no incidían en la velocidad en la respuesta. Por esa razón, los anteriores resultados apuntan a una disociación entre ambas medidas comportamentales y sugieren que las mejoras encontradas en TRs podrían estar inducidas por el ejercicio físico a intensidad ligera-moderada. En cualquier caso, los resultados apuntan a que el ejercicio físico a intensidad ligera-moderada mejoró la capacidad de mantener la atención sostenida de los participantes.

Posteriormente, intentamos aportar evidencia empírica y novedosa acerca de los efectos provocados por el ejercicio físico realizado de forma regular sobre el funcionamiento cognitivo en un grupo de personas sedentarias. El Experimento 5 tenía como objetivo principal analizar los efectos de un programa de entrenamiento físico de diez semanas de duración (3 sesiones de una hora por semana) en las características antropométricas [Índice de Masa Corporal (IMC)], capacidades fisiológicas (UVA, potencia máxima y potencia relativa) y el rendimiento en vigilancia y el control inhibitorio en una población de 32 mujeres jóvenes sanas. Con la intención de valorar la intervención, realizamos dos mediciones (pre-post). En ellas, se recogieron datos de las características antropométricos y datos de las capacidades fisiológicas. Además, se

completaron dos tareas cognitivas para evaluar el rendimiento en vigilancia o atención sostenida y para evaluar el control inhibitorio: 1) tarea de atención sostenida a la respuesta (SART) y 2) tarea de tiempo de reacción simple basada en la SART (TTRS). Crucialmente, la intervención del Experimento 5 demostró su eficacia a nivel físico ya que mejoraron significativamente las características antropométricas y los parámetros fisiológicos de las participantes. Sin embargo, no se encontraron resultados estadísticamente significativos en las tareas comportamentales (TTRS y SART), lo que parece no replicar la mayor parte investigaciones encontradas en la literatura sobre ejercicio físico regular a intensidades aeróbicas moderadas.

En resumen, los resultados de la presente tesis doctoral sugieren que el esfuerzo ligero-moderado contribuye a focalizar eficientemente la atención para optimizar el rendimiento de la tarea. Además, no replicamos el resultado de investigaciones previas que demostraron el efecto de un entrenamiento físico en el rendimiento cognitivo. En las siguientes secciones se discuten las principales implicaciones que estos hallazgos presentan para el entendimiento de la relación entre ejercicio físico y la vigilancia, destacando el importante papel modulador de la intensidad del ejercicio y las demandas que solicita la tarea. Además, apoyándonos en las investigaciones que no apoyan la hipótesis cardiovascular, discutimos los datos no significativos de nuestra intervención de entrenamiento físico regular.

7.2. Efectos del ejercicio físico puntual en vigilancia: Influencia de la intensidad del ejercicio.

Tal y como hemos descrito en el marco teórico, durante la realización de la mayoría de comportamientos que realizamos en nuestra vida, muchos de ellos vinculados a la práctica deportiva, se nos exigen niveles altos de vigilancia para una correcta interacción con el entorno en el que nos desenvolvemos. Muchos investigadores actuales han tomado esto en consideración y han manifestado un interés creciente en los vínculos existentes entre el cerebro/cognición y el deporte/ejercicio físico. Estos investigadores afirman que la consecución correcta de las tareas a realizar y el mantenimiento de un nivel óptimo de vigilancia será crucial en el ámbito deportivo, dado que realizar actividad física es muy demandante debido a la realización concurrente de esfuerzos físicos de distinta intensidad y a la toma de decisiones durante la competición deportiva (ejercicio físico puntual). No obstante, hasta donde alcanza nuestro conocimiento no existen demasiados

estudios con interés particular en el ejercicio físico puntual en vigilancia teniendo en cuenta a la intensidad del ejercicio como moderador principal.

Tal y como venimos sugiriendo a lo largo de la presente tesis doctoral, un moderador clave que influyó en el ejercicio físico puntual y la cognición fue la intensidad del ejercicio. De hecho, cuando se hace uso de protocolos de ejercicio físico a intensidad moderada, que usualmente se encuentra entre el 40% y el 60% del $VO_{2máx}$ (o de la frecuencia cardíaca máxima) y que tienen una duración con una duración de entre 20 y 60 minutos, los resultados muestran relaciones positivas. En este sentido, la investigación anterior apoya nuestros hallazgos y confirman nuestra hipótesis previa sobre la función moderadora de la intensidad en la relación entre el ejercicio y el rendimiento en vigilancia. Además, nuestros hallazgos se apoyaron complementariamente en revisiones meta-analíticas que mostraron un efecto significativo diferencial de intensidad sobre el rendimiento cognitivo evaluado durante el ejercicio (Chang et al., 2012).

Partiendo de la importancia que juega la función moderadora de la intensidad en la relación entre el ejercicio físico y el rendimiento en las tareas de vigilancia, es importante destacar que, tal y como dijimos en nuestro marco teórico, las tareas diseñadas específicamente para medir vigilancia requieren de una alta implicación individual para conseguir mantener la atención en virtud de una ejecución óptima (Manly et al., 2003; O'Connell et al., 2008; Warm et al., 2008). Además, la monotonía característica de la tarea y la alta incertidumbre temporal del objetivo hace que los participantes tengan que mantener su atención durante un largo periodo de tiempo, consiguiendo enfatizar la carga en vigilancia.

Estudios de neuroimagen (Drummond et al., 2015) han mostrado que las demandas de la TVP se han vinculado con la actividad cerebral típicamente asociada con la red de atención sostenida (cf. Lawrence, Ross, Hoffmann, Garavan & Stein, 2003) y de asignación de recursos atencionales (cf. Culham, Cavananagh & Kanwisher, 2001). Esto refleja una activación de mayor magnitud en redes de regiones cerebrales específicas, tanto corticales como subcorticales, que fue asociada a un rendimiento óptimo en tarea. Por lo tanto, los autores destacan como principales áreas implicadas con un óptimo rendimiento de la tarea de vigilancia psicomotora (i.e., giro frontal medio derecho y ganglios de la base) áreas que generalmente han sido vinculadas con el

procesamiento ejecutivo y el rendimiento en tareas de TR (Drommond et al., 2015; Bischoff-Grethe et al., 2004).

Cuando analizamos las funciones cognitivas durante el ejercicio físico puntual, es preciso dejar claro que los individuos o participantes en cuestión tendrán que realizar un ejercicio físico con implicaciones fisiológicas y un trabajo cognitivo con una carga mental determinada de forma concomitante. De acuerdo con lo anterior, cuando se realiza un ejercicio físico determinado se producen gran variedad de alteraciones fisiológicas a nivel central y periférico. Tradicionalmente estas respuestas fisiológicas han sido vinculadas con las teorías de activación/arousal (e.g., Yerkes & Dodson, 1908; Kahnemann, 1973; Humphreys & Revelle, 1984; Sanders, 1986; Hockey, Gaillard & Coles, 1986). De hecho, el arousal inducido (estado general de activación) desempeña un papel fundamental para mantener un nivel óptimo durante diferentes tareas comportamentales que van desde tareas de tiempo de reacción simple, tiempo reacción-elección o tareas de memoria entre otros (Véase Lambourne & Tomporowski, 2010). Por todo ello, podemos sugerir que un rendimiento cognitivo óptimo causado por la realización de esfuerzos físicos estaría tradicionalmente vinculado con un mayor nivel de activación/arousal hasta un punto determinado (Davranche & Audiffren, 2004; McMorris & Graydon, 2000), pero ¿qué sucedería si no llegamos a ese punto “óptimo” de activación? o ¿qué sucedería si finalmente lo sobrepasamos?

Desde nuestro punto de vista, podríamos sugerir que las respuestas fisiológicas podrían ser las responsables de las diferentes variaciones encontradas en el rendimiento en la TVP como función de la intensidad del ejercicio. Nuestros resultados son consistentes con estudios recientes que sugieren que la actuación del sistema reticular durante el ejercicio moderado podría aumentar el rendimiento cognitivo (Dietrich & Audiffren, 2011; McMorris & Hale 2012). Además, de acuerdo con nuestros resultados, podemos confirmar que el rendimiento en vigilancia depende de la intensidad del ejercicio con un punto “óptimo” que oscilaría entre el 75-80% del UVA y que el efecto de esta intensidad “óptima” se mantiene constante en el tiempo, al menos durante 45'. Mientras que el 75-80% del VAT de esfuerzo puntual parecía mejorar el rendimiento de la TVP, los TRs más lentos en el Experimento 1 fueron encontrados en la condición de esfuerzo al 100% del UVA. Precisamente, esta sugerencia está en concordancia con la teoría de Yerkes-Dodson (Yerkes & Dodson, 1908), que sugiere una mejora en el rendimiento cognitivo con el aumento del arousal/activación hasta un nivel de arousal

“moderado” y luego muestra perjuicios por incrementos adicionales del arousal. Ese efecto perjudicial del ejercicio sobre el rendimiento cognitivo en la TVP fue similar al observado en estudios previos que habían medido el rendimiento en tareas con altas demandas atencionales durante el ejercicio a alta intensidad (ver Brisswalter, et al., 2002, Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowki, 2010, para una revisión).

Los resultados de los Experimentos 2-3, parecen encajar también con la hipótesis de la hipofrontalidad transitoria de Dietrich et al., (2003, 2006) que afirma que cuando un individuo está realizando un ejercicio físico de alta intensidad y que además involucre a la atención (función ejecutiva), ambos tendrán que competir por los recursos limitados que poseemos. El propio ejercicio realizará un consumo de una gran cantidad de recursos metabólicos para poder mantener el nivel de funcionamiento de las áreas cerebrales involucradas en el procesamiento motor. Además, durante el ejercicio que realizaron nuestros participantes (independientemente de la intensidad a la que se hizo), esta hipótesis sugiere que existe una activación masiva y sostenida de los sistemas motores y sensoriales en detrimento de la actividad en otras estructuras neuronales. Por esta razón, se produce una inhibición temporal de las regiones cerebrales que no son esenciales para ejecutar el ejercicio específico que ocupa en ese momento. Así, en el caso de las intensidades iguales o inferiores al 75-80% no provocaran déficit de recursos metabólicos por lo que los resultados serán mejorados o al menos no empeorados. Sin embargo, cuando la intensidad llega al 100% del UVA, se originará un gran déficit de recursos metabólicos disponibles para otra regiones cerebrales responsables del procesamiento cognitivo, provocando así el enlentecimiento en nuestros resultados de TR y además, induciendo a una disminución en el rendimiento de ciertas funciones cerebrales vinculadas al control ejecutivo (Dietrich, 2003, 2006).

Recapitulando, la intensidad del ejercicio determinará el rendimiento en una tarea de vigilancia y por tanto verá afectado durante la realización concomitante. De hecho, el ejercicio físico a intensidades moderadas beneficiará el rendimiento cognitivo mejorando la exactitud de respuesta y acelerando los TRs en tareas simples y de discriminación (ver para una revisión, Brisswalter, Collardeau & Arcelin, 2002; Chang et al., 2012; Lambourne & Tomporowski, 2010; Tomporowski, 2003). No obstante, la literatura relacionada con este tópico de investigación parece sugerir que cuando se producen aumentos en la intensidad del ejercicio, los beneficios que se encontraron podrían transformarse (deterioro atencional) sobre todo tareas con altas demandas.

7.3. Efectos del ejercicio físico puntual a intensidad ligera-moderada: Influencia de una tarea de vigilancia tipo “oddball”.

En la presente sección, vamos a destacar el moderador tipo de tarea cognitiva como factor relevante. En este sentido, es preciso comentar que tradicionalmente la vigilancia ha sido medida por medio de tareas de exactitud caracterizadas por la presentación de estímulos no objetivos presentados de forma frecuente entre estímulos objetivos presentados de forma infrecuente durante periodos de larga duración (ver tarea de Mackworth, 1948 para su comprensión). Por todo ello, en el Experimento 4, se cambió la tarea que veníamos utilizando (TVP) por otra de vigilancia tipo “oddball”. Con este cambio de tarea cambiamos las demandas y además, conseguimos incrementar la dificultad perceptiva, aumentando las demandas en términos de vigilancia y disminuyendo las demandas motoras con respecto a la TVP. Sin embargo, nuestros resultados parecen sugerir que el ejercicio físico realizado a intensidad ligera-moderada y concurrentemente a una tarea de vigilancia tipo “oddball” mejora la velocidad de respuesta pero no la exactitud. No obstante, estos resultados no son concluyentes y aunque la dirección del efecto nos pueda llevar a deducir que se han replicado los Experimentos 2-3, debido a que la exigencia de la tarea no demandaba velocidad en la respuesta y aun así, nosotros encontramos ese efecto. Parece por tanto, que los resultados de la presente tesis apuntan a una disociación entre ambas medidas comportamentales y sugieren que las mejoras encontradas (TRs más bajos) inducidas por el esfuerzo ligero-moderado, podrían estar relacionadas con la mayor eficiencia de los componentes motores y en menor medida con procesamiento sensorial más eficiente (Davranche et al., 2005).

Por todo ello, para ayudar a justificar nuestros resultados nos apoyamos en las investigaciones realizadas con EEG, ya que tradicionalmente han señalado que el ejercicio aeróbico realizado a una intensidad moderada mejora las frecuencias altas del espectro de EEG, principalmente en la banda de frecuencia alfa (Lattari & cols, 2014). De igual manera, Kubitz & Pothakos (1997), encontraron cambios en la activación cerebral durante ejercicio aeróbico (10 minutos en cicloergómetro), disminuyendo la frecuencia alfa y aumentando la frecuencia beta. Otras investigaciones coinciden con los aumentos en las frecuencias bajas, especialmente en la potencia theta (Ballard, 1996; Pennekamp et al., 1994). De todos modos, la revisión meta-análítica de Crabble &

Dishman (2004) sugiere que el ejercicio provoca cambios globales a nivel de EEG, y no selectivos a ciertas frecuencias como apuntan algunos estudios.

Sin embargo, en los estudios que buscan relaciones entre el ejercicio físico y una tarea de vigilancia tipo “oddball”, siempre era presentada la tarea comportamental después de la realización del ejercicio y no de manera concurrente a este. Así, el momento temporal en el que se realiza la medición de los beneficios en las tareas de tipo cognitivo es de especial relevancia para el estudio de la vigilancia o atención sostenida, al menos desde la perspectiva de la presente tesis doctoral.

Hasta donde alcanza nuestro conocimiento, sólo conocemos 2 estudios que analizaron la vigilancia con una tarea tipo “oddball” durante el ejercicio y que usaron potenciales corticales evocados eventos para su análisis (Grego et al., 2004; Yagi et al., 1999). Por un lado, Yagi y colaboradores examinaron los cambios en la latencia y amplitud del P300 durante dos intensidades de esfuerzo diferentes (un ejercicio aeróbico de intensidad moderada vs. una condición de estado de reposo). Los participantes realizaron dos modalidades de la tarea oddball (una visual y otra auditiva). Los resultados mostraron que los RTs más rápidos se encontraron en ambas modalidades de la tarea oddball durante el ejercicio de intensidad moderada. Además, encontraron una menor latencia P300 y una disminución de la amplitud durante el ejercicio en comparación con la condición de reposo.

Por otro lado, Grego et al., (2004) examinaron los cambios en P300 durante una larga sesión de ejercicio aeróbico agudo a intensidad moderada y encontraron un aumento de la amplitud y latencia del p300 después de una hora de ejercicio con respecto al tercer minuto de ejercicio, que parece mostrar una relación positiva entre el arousal/excitación inducida por el ejercicio y las mejoras específicas en el rendimiento cognitivo. No obstante, ambos estudios mostraron resultados contradictorios y no esclarecen la literatura de este tema de investigación.

Relevante para nosotros, es el estudio de Ciria, Luque-Casado, Perakakis, Holgado & Sanabria (en preparación) que tuvo como objetivo principal explorar la actividad electrocortical cerebral en adultos jóvenes (tónica y fásica) durante dos sesiones de ejercicio aeróbico puntual realizadas a diferentes intensidades de ejercicio (moderada-alta y ligera). Para ello los autores utilizaron una tarea de vigilancia tipo “oddball” concurrente a la realización del ejercicio. Los resultados mostraron que se incrementaron todas las bandas de frecuencia EEG en ambas sesiones de ejercicio, pero en mayor

magnitud para el ejercicio realizado a intensidad moderada-alta con respecto a la intensidad ligera. Este estudio no encontró diferencias significativas en las medidas comportamentales (exactitud y en TRs).

En definitiva, las anteriores investigaciones [Ciria & cols., (en preparación) Grego et al., 2004) muestran resultados dispares y no esclarecedores por lo que se necesita más investigación al respecto. No obstante, teniendo en cuenta los hallazgos mostrados por la literatura, nuestros resultados parecen apuntar a que el esfuerzo ligero-moderado realizado de forma concurrente a una tarea vigilancia tipo “oddball mejoran la velocidad de respuesta y la exactitud. En cualquier caso, todo parece indicar a una disociación entre ambas medidas comportamentales (exactitud y TRs) y por lo tanto, se podría sugerir que los TRs más rápidos encontrados (marginales) inducidas por el esfuerzo ligero-moderado indican una mejora de la capacidad de mantener la atención sostenida.

7.4. Relación entre el ejercicio físico, adaptaciones crónicas y la cognición.

Los estudios que han explorado las relaciones entre actividad física realizada de forma regular y el funcionamiento cognitivo se ha incrementado en los últimos años (Tomporowski, Lambourne & Okumura, 2011; Van der Niet, Hartman, Smith & Visscher, 2015). Tal y como hemos comentado en el marco teórico, la realización sistemática de esfuerzos físicos (entrenamiento regular) provoca modificaciones perdurables en el tiempo sobre diversas estructuras del organismo (e.g., Hillman, Castelli & Buck, 2005; Hillman et al., 2008; Pesce, 2012).

Anteriormente, comentábamos que las adaptaciones fisiológicas a nivel cardiovascular que repercuten en una buena condición física explican la asociación entre estas variables partiendo los supuestos de “hipótesis cardiovascular”. De hecho, las adaptaciones fisiológicas presupuestas a la práctica regular de ejercicio físico, también se han vinculado con adaptaciones a nivel cerebral, que parecen repercutir de manera positiva sobre el rendimiento cognitivo (Acevedo & Ekkekakis, 2006; Hillman, Erickson & Kramer, 2008; McMorris, Tomporowski & Audiffren 2009; Thomas et al., 2012).

Desde una perspectiva general, la mayoría de estudios encontrados en la literatura dentro de este tópico de investigación sugieren la existencia de una relación positiva entre ejercicio físico y el rendimiento cognitivo (Guiney & Machado, 2013; Colcombe & Kramer, 2003), explicando dicha asociación según la hipótesis cardiovascular. Aunque

este hallazgo está bastante sustentado y confirmado en la literatura, encontramos diferentes meta-análisis que manifiestan ciertas discordancias con la anterior perspectiva. Son ejemplos de esto los meta-análisis de Etnier et al., (1997, 2006), que no apoyaron la hipótesis cardiovascular. Por otro lado, en otro meta-análisis de Young et al., (2015) realizado con personas mayores, no se encontraron evidencias que vincularan la condición física con la mejora de las funciones cognitivas. No obstante, otros meta-análisis realizados con adultos mayores (Angevaren et al., 2008) y en niños en niños pre adolescentes y adolescentes (Verburgh et al., 2013) mostraron pequeñas mejoras en diferentes mecanismos cognitivos.

Entre las limitaciones más relevantes de nuestro Experimento 5, se encuentra la no presencia de un grupo control. Tal y como comentamos, no disponer de un grupo control acotó las posibilidades de explotar los datos de nuestro estudio. Además, limitó la información que se pudo extraer de nuestros datos y cuestiona la veracidad de los resultados encontrados. Otra importante limitación pudo ser el tipo de tareas utilizadas en nuestro Experimento 5, ya que quizás no fueron sensibles a la intervención de 10 semanas. En este sentido, tanto la tarea de TTRS (1080 ensayos) como la SART (duración de 17' aproximadamente), podríamos haberlas diseñado con más demandas en términos de vigilancia. Por lo tanto, si le hubiéramos proporcionado más duración quizás hubiéramos encontrado algún efecto relacionado (decremento de tiempos de reacción con el tiempo-en-tarea o algún otro efecto pre-post) con las tareas de vigilancia, ya que mantener la atención durante largos períodos de tiempo puede conducir a un estado de fatiga mental de los participantes.

Tras analizar todos los aspectos que hemos resaltado anteriormente y observar los resultados obtenidos en el Experimento 5, surgieron diferentes preguntas sobre si el tipo de entrenamiento que utilizamos fue suficiente para producir diversos cambios en el rendimiento de los participantes. En este sentido, el tipo de entrenamiento (controlado de forma virtual), pudo ser una limitación importante de nuestro estudio. Aunque el experimentador manifestó un interés continuo por las participantes (semanalmente) y controlaba virtualmente el entrenamiento, podría haberse dado el caso de que el entrenamiento no se hubiera realizado correctamente, al menos en cuestiones de intensidad y duración. Crucialmente, el programa de entrenamiento estaba supervisado por el experimentador y fue diseñado individualmente, para cada una de las participantes, teniendo en cuenta las características físicas individuales obtenidas en las pruebas

incrementales. Además, dicho programa de actividad física cumplía con las recomendaciones del ACSM (ACSM, 2010). De todos modos, encontramos mejoras físicas promedio, lo cual apoya que nuestra intervención funcionó, pero ¿Qué tipo de entrenamiento sería necesario para producir mejoras sobre la vigilancia? ¿Necesitamos más tiempo para observar cambios? ¿La intensidad y el volumen del entrenamiento puede resultar claves en las mejoras observadas? ¿Sería interesante utilizar entrenamientos interválicos de alta intensidad (HIIT) o entrenamiento de fuerza entre los diferentes entrenamientos de resistencia aeróbica? Nuestra respuesta no es esclarecedora, es decir, hasta el momento no lo sabemos. De hecho, consideramos muy relevante la posibilidad de seguir haciendo investigación que nos ayude a establecer nuevas asociaciones entre el ejercicio físico y función cognitiva.

La duración de la intervención del nuestro estudio es otra de las limitaciones que encontramos. A pesar de que nuestra intervención de 10 semanas de ejercicio regular funcionara a nivel físico en nuestra muestra de adultas jóvenes, no hemos observado resultados estadísticamente significativos en las tareas comportamentales. En este sentido, podríamos considerar que 10 semanas de entrenamiento es una duración insuficiente para obtener beneficios en las tareas comportamentales. De hecho, la mayoría de estudios encontrados en la literatura y que encuentran modificaciones a nivel cognitivo después de una intervención de entrenamiento tienen una duración de al menos 6 meses y como hemos comentado anteriormente se han desarrollado con adultos mayores (Colcombe et al., 2004; Monleón et al., 2015) o con niños (Castelli et al., 2007; Chaddock et al., 2012). En definitiva, las afirmaciones anteriores, sugieren que quizás los cambios perdurables/crónicos no se producen en tan corto espacio de tiempo.

Relevante para nosotros fue el grupo de edad al que elegimos investigar. Normalmente, el interés por analizar los efectos del ejercicio físico se ha manifestado en adultos mayores o en niños y adolescentes (Hillman, Kamijo & Scudder, 2011). Sin embargo, no existen demasiadas investigaciones centradas en población adulta joven. Sugerimos que el uso de una población de estudiantes universitarias sanas (adultas jóvenes), podría haber sido una de las cuestiones por la cual no encontramos los resultados esperados tras nuestra intervención, dado que esta población se encuentra en un pico de rendimiento cognitivo (Salthouse & Davis, 2006). Asimismo, la muestra que elegimos para nuestro estudio no fue aleatoria y a pesar de tener un alto grado de motivación e

interés por participar en la intervención de entrenamiento, no encontramos ningún efecto en términos comportamentales.

CHAPTER VIII

General Conclusions

8.1. GENERAL CONCLUSIONS

This thesis is presented with the purpose of trying to provide novel empirical evidence to extend and clarify the knowledge of effects of physical exercise on attentional functioning. The main objective of this thesis was to study the effects of acute physical exercise on vigilance/sustained attention. Additionally, we assessed the effects of a regular physical exercise intervention in sustained attention and inhibitory control. The general conclusions of this research based on the obtained results are:

- 1) The current dataset demonstrated that the vigilance state during a task with high demands of vigilance attention is affected during acute exercise, an effect that is moderated by effort intensity.
- 2) Our findings suggested that the “optimal” vigilance performance during exercise is achieved at an intensity corresponding to the 75-80% of the VAT and future research will be necessary to elucidate the underlying mechanisms that explain this effect.
- 3) Our findings suggested that exercise at light-moderate intensity improve vigilance/sustained attention irrespective of the task demands.
- 4) Our exploratory experiment showed that after of ten-week physical exercise intervention participants improved their physiological capacities (UVA, $V_{O_{2max}}$ and relative power) and anthropometric characteristics (BMI). However, the results did not replicate the majority of studies found in literature on chronic exercise and cognitive function.

In applied terms, vigilance or sustained attention is the cognitive function that determines goal maintenance capacity and the deployment of attention over the course of a task in order to respond appropriately (quickly and accurately) to relevant stimuli (Sarter et al., 2001). As noted above, a proper level of vigilance plays a fundamental role in sport performance (Krane & Williams, 2006). In addition, our results might help explain slow responses in sport contexts with high demands of vigilance (or focused attention) due to either too low or too high activation. However, we are aware that our research was conducted indoors and using a non-ecologically valid cognitive task, so any generalization to the sport context is limited.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

- Acevedo, E.O., & Ekkekakis, P. (2006) *Psychobiology of Physical Activity*. Human Kinetics.
- Adam, J. J., Teeken, J.C., Ypelaar, P.J., Verstappen, F.J., & Paas, F.W. (1997). Exercised-induced arousal and information processing. *International Journal of Sport Psychology*, 28, 217-226.
- Aks, D. J. (1998). Influence of exercise on visual search: Implications for mediating cognitive mechanisms. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 771–783.
- Allard, F., Brawley, L.R., Deakin, J., & Elliott, D. (1989). The effect of exercise on visual attention performance. *Human Performance*, 2, 131-145.
- American College of Sports Medicine (2010). *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. 9th. ed. London: Lippincott Williams & Wilkins.
- Ando, S., Kimura T., Hamada, T., Kokubu, M., Moritani, T., & Oda, S. (2005). Increase in reaction time for the peripheral visual field during exercise above the ventilatory threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 94: 461-467.
- Angevaren, M., Aufdemkampe, G., Verhaar, H.J., Aleman, A., Vanhees, L. (2008). Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database Syst Rev*. (2):CD005381.
- Arcelin, R., Brisswalter, J., & Delignieres, D. (1997). Effects of physical exercise duration on decision making performance. *Journal of Human Movement Studies*, 32, 123-140.
- Arcelin, R., Delignieres, D., & Brisswalter, J. (1998). Selective effects of physical exercise on choice reaction processes. *Perceptual and Motor Skills*, 87, 175-185.
- Arent, S. M., & Landers, D. M. (2003). Arousal, anxiety, and performance: A reexamination of the inverted-u hypothesis. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(4), 436-444.
- Ariga, A., & Lleras, A. (2011). Brief and rare mental “breaks” keep you focused: Deactivation and reactivation of task goals preempt vigilance decrements. *Cognition*, 118 (3): 439-43.
- Astrand, P.O. (1965). *Work tests with the bicycle ergometer*. Varberg, Sweden: AB Cykelfabriken Monark.

- Audiffren, M., Tomporowski, P. D., & Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise and information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta Psychologica, 129*, 410-419.
- Audiffren, M., Tomporowski, P. D., & Zagrodnik, J. (2009). Acute aerobic exercise and information processing: Modulation of executive control in a Random Number Generation task. *Acta Psychologica, 132*, 85-95.
- Ballard, J.C. (1996). Computerized assessment of sustained attention: a review of factors affecting vigilance performance. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology, 18* (6), 843-863.
- Ballester, R., Huertas, F., Yuste, F.J., Llorens, F., Sanabria, D. (2015). The relationship between regular sports participation and vigilance in male and female adolescents. *PLoS One, 10* (4).
- Bailey, S. P., Holt, C., Pfluger, K. C., La Budde, Z., Afergan, D., Stripling, R., Miller, P. C., & Hall, E. E. (2008). Impact of prolonged exercise in the heat and carbohydrate supplementation on performance of a virtual environment task. *Military Medicine, 173*(2), 187–192.
- Bard, C., & Fleury, M. (1978). Influence of imposed metabolic fatigue on visual capacity components. *Perceptual and Motor Skills, 47*, 1283-1287.
- Basner M., & Dinges D.F., (2011). Maximizing sensitivity of the psychomotor vigilance test (PVT) to sleep loss. *Sleep, 34*(5), 581-591.
- Bender, V.L., & McGlynn, G.H. (1976). The effect of various levels of strenuous to exhaustive exercise on reaction time. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. 35*, 95–101.
- Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review, 30*, 331–551.
- Biddle, S. J., Gorely, T., Marshall, S. J., Murdey, I, y Cameron, N. (2003). Physical activity and sedentary behaviours in youth: issues and controversies. *The Journal of the Royal Society for the Promotion of Health, 124* (1), 29-33.
- Bischoff-Grethe, A., Goedert, K.M., Willingham, D.T., & Grafton, S.T. (2004). Neural substrates of response-based sequence learning using fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*(1):127-38.
- Borg, G. (1998). *Borg's perceived exertion and pain scales*. Champaign, IL, US: Human Kinetics.

- Brisswalter, J., Arcelin, R., Audiffren, M., & Delignières, D. (1997). Influence of physical exercise on simple reaction time: effect of physical fitness. *Perceptual and Motor Skills*, 85, 1019-1027.
- Brisswalter, J., Collardeau, M., & Arcelin, R. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Medicine*, 32(9), 555-566.
- Brisswalter, J., Collardeau, M., & Rene, A. (2002). Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance. *Sports Medicine*, 32, 555–566.
- Brisswalter, J., Durand, M., Delignieres, D., & Legros, P. (1995). Optimal and non-optimal demand in a dual-task of pedaling and simple reaction time: Effects on energy expenditure and cognitive performance. *Journal of Human Movement Studies*, 29, 15-34.
- Bunce, D. (2001). Age differences in vigilance as a function of health-related physical fitness and task demands. *Neuropsychologia*. 39(8):787–97.
- Castelli, D.M, Hillman, C.H., Buck, S.M., & Erwin, H.E.(2007). Physical fitness and academic achievement in third- and fifth-grade students. *Journal of Sport Exercise and Psychology*, 29(2):239–52.
- Caldwell, J.A., Caldwell, J.L., Smith, J.K., & Brown, D.L. (2004) Modafinil's effects on simulator performance and mood in pilots during 37 h without sleep. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 75(9):777-84.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2008). *A collective voice for well-being: The story of the National Community Committee* [booklet]. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services
- Chaddock, L., Erickson, K.I., Prakash, R.S., VanPatter, M., Voss, M.W., Pontifex, M.B., Raine, L.B., Hillman, C.H., & Kramer, A.F. (2010). Basal ganglia volume is associated with aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental Neuroscience*, 32(3):249–56.
- Chaddock, L., Erickson, K.I., Prakash, R.S., Voss, M.W., VanPatter, M., Pontifex, M.B., Hillman, C.H., & Kramer, A.F. (2012). A functional MRI investigation of the association between childhood aerobic fitness and neurocognitive control. *Biological Psychology*, 89(1):260–8.
- Chaddock, L., Erickson, I., Ruchika, S. P., Kim, J. S., Voss, W., VanPatter, M., Pontifex, B. M., Raine, L. B., Konkel, A., Hillman, C. H., Cohen, N. J., y Kramer, A. F. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness,

- hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, 1358, 172-183.
- Chaddock, L., Hillman, C.H., Buck, S.M., & Cohen, N.J. (2011). Aerobic fitness and executive control of relational memory in preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(2):344-9.
- Chaddock, L., Pontifex, M.B., Hillman, C.H., Kramer, A.F. (2011). A review of the relation of aerobic fitness and physical activity to brain structure and function in children. *Journal International of Neuropsychology Social*, 17(6):975-85.
- Chang, Y.K., & Etnier, J.L. (2009). Effects of an acute bout of localized resistance exercise on cognitive performance in middle-aged adults: A randomized controlled trial study. *Psychology of Sport and Exercise*, 10(1):19-24.
- Chang, Y.K., Labban, J.D., Gapin, J.I., & Etnier J.L. (2012). The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Research*, 1453, 87-101.
- Chaouloff, F. (1997). Effects of acute physical exercise on central serotonergic systems. *Medicine and Sciences in sports and exercise*, 29(1):58-62.
- Chmura, J., Nazar, K., & Kaciuba-Uscilko, H. (1994). Choice reaction time during graded exercise in relation to blood lactate and plasma catecholamine thresholds. *International Journal of Sports Medicine*, 15, 172-176.
- Chmura, J., Kryzstofiak, H., Ziemia, A.W. (1998). Psychomotor performance during prolonged exercise above and below the blood lactate threshold. *European Journal of Applied Physiology*, 77, 77-80
- Cian, C., Barraud, P. A., Melin, B., & Raphel, C. (2001). Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *International Journal of Psychophysiology*, 42, 243-251.
- Cian, C., Koulmann, N., Barraud, P. A., Raphel, C., Jimenez, C., & Melin, B. (2000). Influences of variations in body hydration on cognitive function: Effects of hyperhydration, heat stress, and exercise-induced dehydration. *Journal of Psychophysiology*, 14, 29-36.
- Ciria, Luque-Casado, Perakakis, Holgado y Sanabria (en preparación)
- Clark, C.R., Geffen, G.M., & Geffen, L.B. (1989). Catecholamines and the covert orientation of attention in humans. *Neuropsychologia*, 27 (2):131-9.
- Crabble, J.B., & Dishman, R.K., (2004). Brain electrocortical activity during and after exercise: a quantitative synthesis. *Psychophysiology*, 41(4):563-74.

- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Correa, A., Molina, E., Sanabria, D. (2014). Effects of chronotype and time of day on the vigilance decrement during simulated driving. *Accident Analysis & Prevention*, 67, 113-118.
- Colcombe, S. F., & Kramer, A. F. (2003). Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study. *Psychological Science*, 14, 2125-2130.
- Colcombe, S.F., Erickson, K.I., Scalf, P.E., Kim, J.S., Prakash, R., McAuley, E., Elavsky, S., Marquez, D.X., Hu, L., & Kramer, A.F. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *Journal of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences*, 61(11):1166–70.
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., y Cohen, N. J. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings National Academy Science, U.S.A.*, 101(9), 3316-3321.
- Collardeau, M., Brisswalter, J., & Audiffren, M. (2001). Effects of a prolonged run on simple reaction time of well trained runners. *Perceptual and Motor Skills*, 93, 679-689.
- Collardeau, M., Brisswalter, J., Vercruyssen, F., Audiffren, M. y Goubault, C. (2001). Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate availability. *European Journal of Applied Physiology*, 86, 150-156.
- Cotman, C.W., Berchtold, N.C., & Christie, L.A. (2007). Exercise builds brain health: key roles of growth factor cascades and inflammation. *Trends in Neurosciences*, 30(9):464–72.
- Cote, J., Salmela, J., & Papathanasopoulou, K. P. (1992). Effects of progressive exercise on attentional focus. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 351-354.
- Culham, J. C., Cavanagh, P., & Kanwisher, N. G. (2001). Attention response functions: characterizing brain areas using fMRI activation during parametric variations of attentional load. *Neuron*, 32(4), 737-745.
- Davey, C. P. (1973). Physical exertion and mental performance. *Ergonomics*, 16, 595–599.
- Davies, R.D., & Parasuraman, R. (1982). *The psychology of vigilance*. Academic Press.
- Davranche, K., & Audiffren M. (2004). Facilitating effects of exercise on information processing. *Journal of Sports Sciences*, 22, 419–428.

- Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., & Hasbroucq, T. (2005). Information processing during physical exercise: A chronometric and electromyographic study. *Experimental Brain Research*, *165*, 532-540.
- Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M., & Hasbroucq, T. (2006). Physical exercise facilitates motor processes in simple reaction time performance: An electromyographic analysis. *Neuroscience Letters*, *396*(1), 54-56.
- Delignieres, D., Brisswalter, J., & Legros, P. (1994). Influence of physical exercise on choice reaction time in sports experts: The mediating role of resource allocation. *Journal of Human Movement Studies*, *27*, 173-188.
- Del Giorgio, J. M., Hall, E. E., O'Leary, K. C., Bixby, W. R., & Miller, P. C. (2010). Cognitive function during acute exercise: a test of the transient hypofrontality theory. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, *32*, 312-323
- Dinges, D.F., Pack, F., Williams, K., Gillen, K.A., Powell, J.W., Ott, G.E., Aptowicz, C., & Pack, A.I. (1997). Cumulative sleepiness, mood disturbance, and psychomotor vigilance performance decrements during a week of sleep restricted to 4-5 hours per night. *Sleep*, *20* (4): 267-77.
- Dinges, D.F., & Powell, J.W. (1985). Microcomputer analysis of performance on a portable, simple visual RT task during sustained operations. *Behavior research methods, instruments and computers*, *6*: 652-5.
- Dietrich, A. (2003). Functional neuroanatomy of altered states of consciousness: The transient hypofrontality hypothesis. *Consciousness and Cognition*, *12*, 231-256.
- Dietrich, A. (2006). Transient hypofrontality as a mechanism for the psychological effects of exercise. *Psychiatry Research*, *145*, 79-83.
- Dietrich, A., & Audiffren, M. (2011). The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *35*, 1305-1325.
- Dietrich, A., & Sparling, P. B. (2004). Endurance exercise selectively impairs prefrontal-dependent cognition. *Brain and Cognition*, *55*, 516-524.
- Dishman, R. K. (1997). The norepinephrine hypothesis. In W. P. Morgan (Ed.), *Physical Activity and Mental Health* (pp. 199-212). Washington, DC: Taylor & Francis.
- Dorrian, J., Rogers, N.L., & Dinges, D.F. (2005). Psychomotor vigilance performance: Neurocognitive assay sensitive to sleep loss. In Kushida, C. A. (Ed.), *Sleep Deprivation. Clinical issues, pharmacology, and sleep loss effects* (39-70). New York, NY: Marcel Dekker.

- Dorrian, J., Roach, G.D., Fletcher, A., & Dawson, D. (2007). Simulated train driving: fatigue, self-awareness and cognitive disengagement. *Applied ergonomics*, 38 (2): 155-66.
- Douchamps, J. (1988). A metatheoretical approach of operational performance. In J. P. Leonard (Ed.), *Vigilance: Methods, models and regulation* (pp. 23–34). Frankfurt: Long.
- Drummond, S.P., Bischoff-Grethe, A., Dinges, D., Ayalon, L., Mednick, S.C., & Meloy, M.J. (2005). The Neural Basis of the Psychomotor Vigilance Task. *Sleep*, 28 (9), 1059-1068.
- Dunn, M.E., Burbine, T., Bowers, C.A., Tantleff-Dunn, S. (2001). Moderators of stress in parents of children with autism. *Community Mental Health Journal*, 37(1):39-52.
- Easterbrook, J. A. (1959). The effect of emotion on cue utilization and the organization of behavior. *Psychological Review*, 1959(66), 183-201.
- Etnier, J. L., Nowell, P. M., Landers, D. M., & Sibley, B. A. (2006). A meta-regression to examine the relationship between aerobic fitness and cognitive performance. *Brain Research Review*, 52, 119-130.
- Etnier, J. L., Salazar, W., Landers, D. M., Petruzzello, S. J., Han, M., & Nowell, P. (1997). The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 19, 249-277.
- Erickson, K.I., Gildengers, A.G., & Butters, M.A. (2013). Physical activity and brain plasticity in late adulthood. *Dialogues in Clinical Neurosciences*, 15(1):99-108.
- Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kramer, A. F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *PNAS*, 108(7), 3017-3022.
- Ferris, L.T., Williams, J.S., Shen, C. (2007). The effect of acute exercise on serum brain-derived neurotrophic factor levels and cognitive function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39, 728–734.
- Fery, Y. A., Ferry, A., Vom-Hofe, A., & Rieu, M. (1997). Effect of physical exhaustion on cognitive functioning. *Perceptual and Motor Skills*, 84, 291-198.
- Fleury, M., & Brad, C. (1987). Effects of different types of physical activity on the performance of perceptual tasks in peripheral and central vision and coincident timing. *Ergonomics*, 30, 945-958.

- Fleury, M., Brad, C., Jobin, J., & Carriere, L. (1981). Influence of different types of physical fatigue on a visual detection task. *Perceptual and Motor Skills*, 53, 723-730.
- Grahn, J. A., & Manly, T. (2012). Common Neural Recruitment across Diverse Sustained Attention Tasks. *PLoS ONE*, 7(11).
- Grego, F., Vallier, J. M., Collardeau, M., Bermon, S., Ferrari, P., Candito, M., Bayer, P., Magnié, M. N., & Brisswalter, J. (2004). Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counterregulatory hormones in male cyclists. *Neuroscience Letters*, 364, 76-80.
- Gondola, J. C. (1987). The effects of a single bout of aerobic dancing on selected tests of creativity. *Journal of Social Behavior and Personality*, 2, 275-278.
- Guiney, H., & Machado, L. (2013). Benefits of regular aerobic exercise for executive functioning in healthy populations. *Psychonomic Bulletin and Review*, 20(1):73–86.
- Hancock, P.A., & Hart, S.G. (2002). Defeating terrorism: What can human factors/ergonomics offer? *Ergonomics in Design*, 10 (1), 6-16.
- Haskell, W.L., Lee, I.M., Pate, R.R., Powell, K.E., Blair, S.N., Franklin, B.A., Macera, C.A., Heath, G.W., Thompson, P.D., & Bauman, A. (2007). Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, 116: 1081-93.
- Heckler, B., & Croce, R. (1992). Effects of time of posttest after two durations of exercise on speed and accuracy of addition and subtraction by fit and less-fit women. *Perceptual and Motor Skills*, 75, 1059-1065.
- Herrmann, D. J., Yoder, C., Gruneberg, M., & Payne, D. (2006). *Applied cognitive psychology: A textbook* (1st ed.). Philadelphia, PA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hillman, C. H., Castelli, D. M., & Buck, S. M. (2005). Aerobic fitness and cognitive function in healthy preadolescent children. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 37, 1967-1974.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., & Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nature Review in Neuroscience*, 9, 58-65.
- Hillman, C.H., Kamijo, K., & Scudder, M. (2011). A review of chronic and acute physical activity participation on neuroelectric measures of brain health and cognition during childhood. *Preventive Medicine*, 52 Suppl 1:S21-8.

- Hillman, C. H., Kramer, A. F., Belopolsky, A. V. & Smith, D. P. (2006) Physical activity, aging, and executive control: implications for increased cognitive health. *International Journal of Psychophysiol*, 59, 30-39.
- Hillman, C. H., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Castelli, D. M., Hall, E. E., & Kramer, A. F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159, 1044-1054.
- Hillman, C. H., Snook, E. M., & Jerome, G. J. (2003). Acute cardiovascular exercise and executive control function. *International Journal of Psychophysiology*, 48, 307-314.
- Hockey, G. R. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: a cognitive-energetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73–93.
- Hockey, G.R., Gaillard, A.W., & Coles, M.G. (1986). Energetic Aspects of Human Information Processing. Nijhoff, Netherlands.
- Hoffman, P. (1997). The endorphin hypothesis. In W. P. Morgan (Ed.), *Physical Activity and Mental Health* (pp. 161–177). Washington, DC: Taylor & Francis.
- Hogervorst, E., Riedel, W., Jeukendrup, A., & Jolles, J. (1996). Cognitive performance after strenuous physical exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 83, 479-488.
- Huertas, F., Zahonero, J., Sanabria, D., & Lupiáñez, J. (2011). Functioning of the Attentional Networks at Rest vs. During Acute Bouts of Aerobic Exercise. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, 33, 649-665.
- Hull, C. L. (1943). *Principles of behavior*. New York: Appleton.
- Humphreys, M. S., & Revelle, W. (1984). Personality, motivation, and performance: A theory of the relationship between individual differences and information processing. *Psychological Review*, 91(2), 153-184.
- Ide, K., Schmalbruch, I. K., Quistorff, B., Horn, A., & Secher, N. H. (2000). Lactate, glucose and O₂ uptake in human brain during recovery from maximal exercise. *Journal of Physiology*, 522, 159-164.
- Isaacs, L. D., & Pohlman, E. L. (1991). Effects of exercise intensity on an accompanying timing task. *Journal of Human Movement Studies*, 20, 123-131.
- Jennings, J. R., & Wood, C. C. (1976). The e-adjustment procedure for repeated-measures analyses of variance. *Psychophysiology*, 13, 277-278.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

- Kamijo, K., Hayashi, Y., Sakai, T., Yahiro, T., Tanaka, K., & Nishihira, Y. (2009). Acute effects of aerobic exercise on cognitive function in older adults. *Journal of Gerontology B-Psychology*, *64*, 356–363.
- Kamijo, K., Nishihira, Y., Hatta, A., Kaneda, T., Kida, T., Higashiura, T., et al. (2004). Changes in arousal level by differential exercise intensity. *Clinical Neurophysiology*, *115*, 2693-2698.
- Kamijo, K., Nishihira, Y., Hatta, A., Kaneda, T., Wasaka, T., Kida, T., & Kuroiwa, K. (2004). Differential influences of exercise intensity on information processing in the central nervous system. *European Journal of Applied Physiology*, *92*, 305-311.
- Kamijo, K., Nishihira, Y., Higashiura, T., & Kuroiwa K. (2007). The interactive effect of exercise intensity and task difficulty on human cognitive processing. *International Journal of Psychophysiology*, *65*(2):114-21.
- Kamijo, K., Pontifex, M.B., O’Leary, K.C., Scudder, M.R., Wu, C.T., Castelli, D.M., & Hillman, C.H. (2011). The effects of an afterschool physical activity program on working memory in preadolescent children. *Developmental Science*. *14*(5):1046-58.
- Kenney, W.L., Willmore, J.H., & Costill, D.L. (2013). *Physiology of sport and exercise*. 5^a ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2013. 640 p.
- Kramer, A. F., Hahn, S., Cohen, N. J., Banich, M. T., McAuley, E., Harrison, C. R., et al. (1999). Ageing, fitness and neurocognitive function. *Nature*, *400*, 418-419.
- Krane, V., & Williams, J. M. (2006). Psychological characteristics of peak performance. In J. M. Williams (Ed.), *Applied sport psychology: Personal growth to peak performance*, 207-227. New York: McGraw-Hill.
- Kruk, B., Chmura, J., Krzeminski, K., Ziemia, A.W., Nazar, K., Pekkarinen, H., & Kaciuba-Uscilko, H. (2001). Influence of caffeine, cold and exercise on multiple choice reaction time. *Psychopharmacology*, *157*, 197–201.
- Kubitz, K.A., & Pothakos, K., (1997). Does aerobic exercise decrease brain activation? *Journal of Sport & Psychology*. *19*, 291-301.
- Lambourne K., & Tomporowski PD. (2010). The effect of acute exercise on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain Research Reviews*, *1341*, 12–24.

- Langner, R., & Eickhoff, S. B. (2013). Sustaining Attention to Simple Tasks: A Meta-Analytic Review of the Neural Mechanisms of Vigilant Attention. *Psychological bulletin*, 139(4), 870-900.
- Lara, T., Madrid, J.A., & Correa, A. (2014). The vigilance decrement in executive function is attenuated when individual chronotypes perform at their optimal time of day. *PLoS One*, 9(2):e88820.
- Lawrence, N. S., Ross, T. J., Hoffmann, R., Garavan, H., & Stein, E. A. (2003). Multiple Neuronal Networks Mediate Sustained Attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15 (7), 1028-1038.
- Lee, I. M., & Skerrett, P. J. (2001). Physical activity and all-cause mortality: What is the dose-response relation? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33 (Suppl.), 459-471.
- Lee, P.H., Macfarlane, D.J., Lam, T.H., & Stewart, S.M., (2011). Validity of the International Physical Activity Questionnaire Short Form (IPAQ-SF): a systematic review. *International Journal of Behavioral nutrition and physical activity*, 8:115.
- Levitt, S., & Gutin, B. (1971). Multiple choice reaction time and movement time during physical exertion. *Research Quarterly*, 42, 405-411.
- Llorens, F., Sanabria, D., & Huertas, F. (2015). The influence of acute intense exercise on exogenous spatial attention depends on physical fitness level. *Experimental Psychology*, 62 (1): 20-9.
- Loh, S., Lamond N., Dorrian J., Roach G., & Dawson, D., (2004). The validity of psychomotor vigilance tasks of less than 10-minute duration. *Behavior Research Methods, Instruments, and Computers*, 36(2):339-46.
- Luque-Casado, A., Perakakis, P., Ciria, L., & Sanabria, D. (2016a). Transient autonomic responses during sustained attention in high and low fit young adults. *Scientific Reports*. 6: 27556.
- Luque-Casado, A., Perakakis, P., Hillman, C. H., Kao, S.C., Llorens, F., Guerra, P., & Sanabria, D. (2016b). Differences in Sustained Attention Capacity as a Function of Aerobic Fitness. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 48 (5), 887–895.
- Magnié, M.N., Bermon, S., Martin, F., Madany-Lounis, M., Suisse, G., Muhammad, W., & Dolisi, C. (2000). P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. *Psychophysiology*, 37(3):369-77.

- Manly, T., Owen, A.M., McAvinue, L., Datta, A., Lewis, G.H., Scott, S.K., & Robertson, I.H. (2003). Enhancing the sensitivity of a sustained attention task to frontal damage: convergent clinical and functional imaging evidence. *Neurocase*, 9:340–349.
- Martens, R., & Landers, D. M. (1970). Motor performance under stress: A test of the inverted-u hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 16, 29-37.
- Mackworth, J.F., & Webb, E.C. (1948). The inhibition of serum cholinesterase by alkyl fluorophosphonates. *Biomechanical Journal*, 42 (1): 91-5.
- McGlynn, G. H., Laughlin, N. T., & Bender, V. I. (1977). Effect of strenuous to exhaustive exercise on a discrimination task. *Perceptual and Motor Skills*, 44, 1139-1147.
- McGlynn, G. H., Laughlin, N. T., & Vivienne, R. (1979). The effect of increasing levels of exercise on mental performance. *Ergonomics*, 22, 407-414.
- McMorris, T. (1995). The effect of exercise on simple reaction time. In R. Vanfraechem-Raway & Y. Vanden Auweele (Eds.), *Proceedings of the IXth European congress on sport psychology* (pp. 952-959). Brussels: Belgian Federation of Sport Psychology.
- McMorris, T., Collard, K., Corbett, J., Dicks, M., & Swain, J. P. (2008). A test of the catecholamines hypothesis for an acute exercise–cognition interaction. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 89, 106-115.
- McMorris, T., Davranche, K., Jones, G., Hall, B., Corbett, J., & Minter, C. (2009). Acute incremental exercise, performance of a central executive task, and sympathoadrenal system and hypothalamic-pituitary-adrenal axis activity. *International Journal of Psychophysiology*, 73(3), 334-340.
- McMorris, T., Delves, S., Sproule, J., Lauder, M., & Hale, B. (2005). Effect of incremental exercise on initiation and movement times in a choice response, whole body psychomotor task. *British Journal of Sport Medicine*, 39(8):537-41.
- McMorris, T., & Graydon, J. (1996a). Effects of exercise on soccer decision-making tasks of differing complexities. *Journal of Human Movement Studies*, 30, 177-193.
- McMorris, T., & Graydon, J. (1996b). The effects of exercise on the decision-making performance of experienced and inexperienced soccer players. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 67, 109-114.
- McMorris, T., & Graydon, J. (1997). Effect of exercise on cognitive performance in soccer-specific tests. *Journal of Sports Sciences*, 15, 459-468.

- McMorris, T., & Graydon, J. (2000). The effect of incremental exercise on cognitive performance. *International Journal of Sport Psychology*, 31, 66-81.
- McMorris, T., & Hale, B.J. (2012). Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain Cognition*, 80 (3), 338–351.
- McMorris, T., & Hale, B.J. (2015). Is there an acute exercise-induced physiological/biochemical threshold which triggers increased speed of cognitive functioning? A meta-analytic investigation. *Journal of Sport and Health Science*, 4, 4-13.
- McMorris, T., & Keen, P. (1994). Effect of exercise on simple reaction times of recreational athletes. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 123-130.
- McMorris, T., Tallon, M., Williams, C., Sproule, J., Potter, J., Swain, J., et al. (2003). Incremental exercise, plasma concentrations of catecholamines, reaction time, and motor time during performance of a noncompatible choice response time task. *Perceptual and Motor Skills*, 97, 590–604.
- McMorris, T., Tomporowski, P., & Audiffren, M. (2009). *Exercise and cognitive function*. Michigan: Wiley-Blackwell.
- Monleón, C., Ballester, R., Sanchis, C., Llorens, F., Martín, M., & Pablos, A. (2015). The Effects of Eight-Month Physical Activity Intervention on Vigilance Performance in Adult Obese Population. *Journal of Motor Behavioral*, 47(6):476-8
- Muto, V., Jaspar, M., Meyer, C., Kussé, C., Chellappa, S. L., Degueldre, C., Balteau, E., Shaffii-Le Bourdieu, A., Luxen, A., Middleton, B., Archer, S.N., Phillips, C., Collette, F., Vandewalle, G., Dijk, D-J., & Maquet, P. (2016). Local modulation of human brain responses by circadian rhythmicity and sleep debt. *Science*, 353(6300), 687-690.
- Myers, J., & Ashley, E. (1997). Dangerous curves. A perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. *Chest*, 111, 787-795.
- Nielsen, H. B., Bredmose, P.B., Stromstad, M., Volianitis, S., Quistorff, B., & Secher, N. H. (2002). Bicarbonate attenuates arterial desaturation during maximal exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, 93, 724-731. (Nakamura et al., 1999).
- Oken, B. S., Salinsky, M. C., & Elsas, S. M. (2006). Vigilance, alertness, or sustained attention: physiological basis and measurement. *Clinical Neurophysiology*, 117(9), 1885-1901.

- Paas, F.G & Adam, J.J. (1991). Human information processing during physical exercise. *Ergonomics*, 34, 1385-1397.
- Paluska, S.A., & Schwenk, T.L. (2000). Physical activity and mental health: current concepts. *Sports Medicine*, 29(3):167-80.
- Parasuraman, R. (1987). Human-computer monitoring. *Human Factors*, 29, 695-706
- Pennekamp, P., Boesel, R., Mecklinger, A., & Ott, H. (1994). Differences in EEG-theta for responded and omitted targets in a sustained attention task. *Journal of Psychophysiology*, 8, 131-141.
- Pereira, A.C., Huddleston, D.E., Brickman, A.M., Sosunov, A.A., Hen, R., McKhann, G.M., et al. (2007). An in vivo correlate of exercise-induced neurogenesis in the adult dentate gyrus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(13):5638-43.
- Pesce, C., Capranica, L., Tessitore, A., & Figura, F. (2002). Effects of a submaximal physical load on the orienting and focusing of visual attention. *Journal of Human Movement Studies*, 42, 401-420.
- Pesce, C., Tessitore, A., Casella, R., Pirritano, M., & Capranica, L. (2007). Focusing of visual attention at rest and during physical exercise in soccer players. *Journal of Sports Sciences*, 25, 1259-1270.
- Pesce, C. (2012). Shifting the Focus From Quantitative to Qualitative Exercise Characteristics in Exercise and Cognition Research. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 34, 766-786.
- Pesce, C., Capranica, L., Tessitore, A., & Figura, F. (2003). Focusing of visual attention under submaximal physical load. *International Journal of Sport Psychology*, 1, 275-292.
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years After. *Annual review of neuroscience*, 35, 73-89.
- Petruzzello, S.J., Landers, D.M., Hatfield, B.D., Kubitz, K.A., & Salazar, W. (1991). A meta-analysis on the anxiety-reducing effects of acute and chronic exercise. Outcomes and mechanisms. *Sports Medicine*, 11(3):143-82.
- Pontifex, M.B., & Hillman, C.H. (2007). Neuroelectric and behavioral indices of interference control during acute cycling. *Clinical Neurophysiology*, 118(3):570-80.
- Pontifex, M.B., Raine, L.B., Johnson, C.R., Chaddock, L., Voss, M.W., Cohen, N.J., Kramer, A.F., & Hillman, C.H. (2013). Cardiorespiratory fitness and the flexible

- modulation of cognitive control in preadolescent children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23 (6): 1332-45.
- Pontifex, M.B., Saliba, B.J., Raine, L.B., Picchietti, D.L., & Hillman, C.H. (2013). Exercise improves behavioral, neurocognitive, and scholastic performance in children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of Pediatrics*, 162 (3):543-51.
- Pontifex, M.B., Scudder, M.R., Brown, M.L., O'Leary, K.C., Wu, C.T., Themanson, J.R., & Hillman, C.H. (2010). On the number of trials necessary for stabilization of error-related brain activity across the life span. *Psychophysiology*, 47(4):767-73.
- Pontifex, M.B., Scudder, M.R., Drollette, E.S., & Hillman, C.H. (2012). Fit and vigilant: the relationship between poorer aerobic fitness and failures in sustained attention during preadolescence. *Neuropsychology*. 26(4):407-13.
- Predovan, D., Fraser, S.A., Renaud, M., & Bherer, L. (2012). The effect of three months of aerobic training on stroop performance in older adults. *Journal of Aging Research*, 2012:269815.
- Reilly, T., & Smith, D. (1986). Effect of work intensity on performance in a psychomotor task during exercise. *Ergonomics*, 29, 601-606.
- Renaud, M., Maquestiaux, F., Joncas, S., Kergoat, M.J., Bherer, L. (2010). The effect of three months of aerobic training on response preparation in older adults. *Frontiers in aging neuroscience*. 2:148.
- Rasmussen, P., Stie, H., Nielsen, B., & Nybo, L. (2006). Enhanced cerebral CO2 reactivity during strenuous exercise in man. *European Journal of Applied Physiology*, 96 (3):299-304.
- Rosenberg, M. D., Finn, E. S., Scheinost, D., Papademetris, X., Shen, X., Constable, R. T., & Chun, M. M. (2016). A neuromarker of sustained attention from whole-brain functional connectivity. *Nature neuroscience*, 19(1), 165-171.
- Salmela, J. H., & Ndoye, O. D. (1986). Cognitive distortions during progressive exercise. *Perceptual and Motor Skills*, 63, 1067-1072.
- Salthouse, T.A., Davis, H.P. (2006). Organization of cognitive abilities and neuropsychological variables across the lifespan. *Developmental Review*, 26:31–54.

- Sanabria, D., Morales, E., Luque, A., Galvez, G., Huertas, F., & Lupiáñez, J. (2011). Effects of aerobic exercise on exogenous spatial attention. *Psychology of Sport and Exercise, 12*(5), 570-574.
- Sanabria, D., Capizzi, M., & Correa, A. (2011). Rhythms that speed you up. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 37*, 236-244.
- Sanders, A. F. (1983). Towards a model of stress and human performance. *Acta Psychologica, 53*, 61–97.
- Sarter, M., Given, B., & Bruno, J.P. (2001). The cognitive neuroscience of sustained attention: where top-down meets bottom-up. *Brain Research Reviews, 35*(2):146-160.
- Scudder, M.R., Drollette, E.S., Pontifex, M.B., & Hillman, C.H. (2012). Neuroelectric indices of goal maintenance following a single bout of physical activity. *Biological Psychology, 89* (2): 528-31.
- Scudder, M.R., Federmeier, K.D., Raine, L.B., Direito, A., Boyd, J.K., & Hillman, C.H. (2014). The association between aerobic fitness and language processing in children: implications for academic achievement. *Brain Cognition, 87*:140-52.
- Secher, N. H., Seifert, T., & Van Lieshout, J. J. (2008). Cerebral blood flow and metabolism during exercise: implications for fatigue. *Journal of Applied Physiology, 104*, 306-314.
- Serwah, N., Marino, F.E., 2006. The combined effects of hydration and exercise heat stress on choice reaction time. *Journal of Science and Medicine in Sport, 9*, 157–164.
- Sibley, B. A., Etnier, J. L., & Le Masurier, G. C. (2006). Effects of an acute bout of exercise on cognitive aspects of Stroop performance. *Journal of Sport & Exercise Psychology, 28*, 285–299.
- Sjöberg, H. (1975). Relations between heart rate, reaction speed, and subjective effort at different workloads on a bicycle ergometer. *Journal of Human Stress, 1*, 21–27.
- Sjoberg, H., (1977). Interaction of task difficulty, activation, and workload. *Journal of Human Stress 3*, 33–38.
- Smit, A.S., Eling, P., & Coenen, A.M. (2004). Mental effort affects vigilance enduringly: after-effects in EEG and behavior. *International Journal of Psychophysiology, 53*, 239-243.

- Smit, A. S., Eling, P. A., Hopman, M. T., & Coenen, A. M. (2005). Mental and physical efforts affect vigilance differently. *International Journal of Psychophysiology*, 57, 211-217.
- Smith, P.J., Blumenthal, J.A., Hoffman, B.M., Cooper, H., Strauman, T.A., Welsh-Bohmer, K., Browndyke, J.N., & Sherwood, A. (2010). Aerobic Exercise and Neurocognitive Performance: A Meta-Analytic Review of Randomized Controlled Trials. *Psychosomatic Medicine*, 72(3):239–52.
- Steinmayr, R., Ziegler, M., & Träuble, B. (2010). Do intelligence and sustained attention interact in predicting academic achievement? *Learning and Individual Differences*, 20, 14-18.
- Tanaka, H., Monahan, K. D. & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of American College of Cardiology*, 37, 153-156.
- Tenenbaum, G., Yuval, R., Elbaz, G., Gar-Eli, M., & Weinberg, R. (1993). The relationship between cognitive characteristics and decision making. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 18, 48-62.
- Themanson, J.R., Pontifex, M.B., Hillman, C.H. (2008). Fitness and action monitoring: evidence for improved cognitive flexibility in young adults. *Neuroscience*. 19; 157(2):319–28.
- Thomas, A.G., Dennis, A., Bandettini, P.A., Johansen-Berg, H. (2012). The effects of aerobic activity on brain structure. *Frontiers in Psychology*. 3:86.
- Tomprowski, P. D. (2003). Effects of acute bouts of exercise on cognition. *Acta Psychologica*, 112, 297-324.
- Tomprowski, P. D. (2009). Methodological issues: Research approaches, research design, and task selection. En T. McMorris, P. D. Tomprowski y M. Audiffren (Eds), *Exercise and Cognitive Function* (pp. 91–112). Chichester: John Wiley & Sons.
- Tomprowski, P., Cureton, K., Armstrong, L., Kane, G., Sparling, P., & Millard-Stafford, M. (2005). Short-term effect of aerobic exercise on executive processes and emotional reactivity. *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 3(2), 131–146.
- Tomprowski, P. D., Ellis, N. R., & Stephens, R. (1987). The immediate effects of strenuous exercise on free recall memory. *Ergonomics*, 30, 121-129.

- Tomprowski, P. D., Lambourne, K., & Okumura, M. S. (2011). Physical activity interventions and children's mental function: an introduction and overview. *Preventive Medicine*, 52 Suppl 1, S3-9.
- Travlos, A. K., & Marisi, D. Q. (1995). Information processing and concentration as a function of fitness level and exercise induced activation to exhaustion. *Perceptual and Motor Skills*, 80, 15-26.
- Trudeau, F., & Shephard, R.J. (2008). Physical education, school physical activity, school sports and academic performance. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 5: 10.
- Walsh, V. (2014). Is sport the brain's biggest challenge? *Current Biology*, 24(18), R859-R860.
- Van der Niet, A.G., Smith, J., Scherder, E.J., Oosterlaan, J., Hartman, E., & Visscher, C. (2015). Associations between daily physical activity and executive functioning in primary school-aged children. *Journal of Science and Medicine in Sports*, 18 (6):673-7.
- Van Dongen, E.V., Kersten, I.H., Wagner, I.C., Morris, R.G., & Fernández (2016). Physical Exercise Performed Four Hours after Learning Improves Memory Retention and Increases Hippocampal Pattern Similarity during Retrieval. *Current Biology*, 26 (13):1722-7.
- Van Praag, H., Kempermann, G., Gage, F.H. (1999) Running increases cell proliferation and neurogenesis in the adult mouse dentate gyrus. *Nature Neuroscience*, 2(3):266-70.
- Verburgh, L., Könings, M., Scherder, E.J., & Oosterlaan, J. (2013). Physical exercise and executive functions in preadolescent children, adolescents and young adults: a meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 48 (12): 973-9.
- Voss, M.W., Nagamatsu, L.S., Liu-Ambrose, T., Kramer, A.F. (1985). Exercise, brain, and cognition across the life span. *Journal of Applied Physiology*, 111(5):1505-13.
- Voss, M. W., Nagamatsu, L. S., Liu-Ambrose, T., & Kramer, A. F. (2011). Exercise, brain, and cognition across the life span. *Journal of Applied Physiology*, 111(5), 1505-1513.
- Wagenmakers, E.-J., Wetzels, R., Borsboom, D., van der Maas, H. L. J., & Kievit, R. A. (2012). An Agenda for Purely Confirmatory Research. *Perspectives on*

- Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, 7(6), 632-638.
- Warm, J.S., Parasuraman, R., & Matthews, G. (2008). Vigilance requires hard mental work and is stressful. *Human Factors*, 50:433-41.
- Weinberg, R. S., & Gould, D. (1995). *Foundations of sport and exercise psychology*. Illinois: Human Kinetics.
- Wiggins, M.W. (2011). Vigilance decrement during a simulated general aviation flight. *Applied Cognitive Psychology*, 1; 25(2):229–35.
- Wilkinson, R.T., & Houghton, D. (1982). *Field test of arousal: A portable reaction timer with data storage*. *Human Factor*, 24 (4): 487-93.
- Wilmore, J. H., & Costill, D. L. (2007). *Fisiología del esfuerzo y del deporte* (6ª ed.). Barcelona: Paidotribo.
- Yagi, Y., Coburn, K.L., Estes, K.M., & Arruda, J.E. (1999). Effects of aerobic exercise and gender on visual and auditory P300, reaction time, and accuracy. *European Journal of Physiology and Occupational Physiology*, 80 (5): 402-8.
- Yeh, M.P., Gardner, R.M., Adams, T.D., Yanowitz, F.G., & Crapo, R.O. (1983) “Anaerobic threshold”: problems of determination and validation. *Journal of Applied Physiology*, 55, 1178-1186.
- Yerkes, R.M. & Dodson, J.D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459–482.
- Young, J., Angevaren, M., Rusted, J., & Tabet, N. (2015) Aerobic exercise to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, Issue 4. Art. No.: CD005381.