



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

**EFFECTOS AGUDOS DEL ENTRENAMIENTO
DE ALTA INTENSIDAD SOBRE LAS
FUNCIONES COGNITIVAS DE ESTUDIANTES
UNIVERSITARIOS**

**PRESENTADA POR:
MANUEL DE DIEGO MORENO**

**DIRIGIDA POR:
ANTONIO MARTÍNEZ AMAT
JOSÉ DANIEL JIMÉNEZ GARCÍA**

JAÉN, 20 DE DICIEMBRE DE 2022

AGRADECIMIENTOS

En una tesis doctoral es difícil en una única página dar las gracias a todas las personas que directa o indirectamente han intervenido e influido sobre ella. Así que, como reza la famosa cita anónima *“son todos los que están, pero no están todos los son”*. Por ello, espero que nadie de los que ha aportado su granito de arena a este trabajo se sienta ofendido si no aparece en los siguientes párrafos, no están vuestros nombres escritos en estas líneas, pero si están en mi mente mientras las escribo.

Primero quiero dar las gracias al director de esta tesis, D. Antonio Martínez Amat, por su claridad y honestidad desde el primer minuto en la que me puse en sus manos, y por dibujar para mí una línea clara de a donde tenía que ir. El planteamiento de toda esta investigación nació de él y ha sido de gran ayuda para mi proceso de desarrollo como investigador.

Sin duda, a mi tutor, Daniel Jiménez García. Ha sido mi alumno, mi colega y ahora mi profesor; es curiosa como la vida te pone en un rol u otro conforme lo vas necesitando. Ha ejercido de faro durante este proceso, ha marcado los pasos a seguir y el ritmo a llevar, y evidentemente, gran parte de esta investigación es fruto de su ayuda y su interés. Mis más sinceros agradecimientos por todo lo que me ha aportado.

Y por último, a la Universidad de Jaén, a EADE y a sus alumnos. Por su colaboración desinteresada en este proyecto, facilitarme todo lo que he necesitado, y brindarme su apoyo durante todo el proceso.

*A mi familia y amigos, por vuestra comprensión
y apoyo durante este proceso. Unas simples
palabras de ánimo en el momento adecuado
pueden ser la chispa que reaviva
la motivación por continuar.*

*A Marián, mi mujer, amiga, y consejera.
Sin su ayuda y motivación constante
no habría podido terminar
este proyecto.*



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

Profesor Dr. Antonio Martínez Amat
Profesor Contratado Doctor

Departamento de Ciencias de la Salud
Universidad de Jaén

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Antonio Martínez Amat y el Dr. D. Daniel Jiménez García, Directores de la Tesis
Doctoral titulada

*“EFECTOS AGUDOS DEL ENTRENAMIENTO DE ALTA INTENSIDAD SOBRE LAS FUNCIONES COGNITIVAS
EN EL ALUMNADO UNIVERSITARIO”,*

realizada por D. Manuel de Diego Moreno en el Departamento de Ciencias de la Salud.
Autorizan su presentación a trámite dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.
Lo firmo, para dar cumplimiento a los Reales Decretos 56/2005 y 778/98, en Jaén
a 9 de Noviembre de 2022.

MARTINEZ
AMAT
ANTONIO -
45711228Q

Firmado digitalmente
por MARTINEZ AMAT
ANTONIO - 45711228Q
Fecha: 2022.11.08
17:12:31 +01'00'

Dr. D. Antonio Martínez Amat

JIMENEZ GARCIA
JOSE DANIEL -
74895450K

Firmado digitalmente por
JIMENEZ GARCIA JOSE
DANIEL - 74895450K
Fecha: 2022.11.08
18:48:37 +01'00'

Dr. D. Daniel Jiménez García

Departamento de Ciencias de la Salud
Paraje Las Lagunillas, s/n – Edificio B3 - 23071 – Jaén
Tel. (+34) 953.21.18.51 - Fax (+34) 953 21 29 43

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 : MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Estado cognitivo en el alumnado universitario.....	3
1.2. Efectos del ejercicio físico sobre el estado cognitivo.....	11
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA.....	27
2.1. Diseño del estudio y participantes.....	27
2.2. Cálculo del tamaño muestral.....	27
2.3. Asignación a la intervención.....	28
2.4. Procedimiento.....	28
2.5. Instrumentos.....	30
2.6. Análisis de los datos.....	30
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	31
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN.....	34
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	39
REFERENCIAS.....	40
ANEXOS.....	54

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1: Diagrama de flujo del estudio	28
Figura 2: Certificado del Comité de Étic	29
Figura 3: Boxplot de respuestas correctas en el test Stroop	32
Figura 4: Boxplot de tiempo más rápido de respuestas en el test Stroop	32
Figura 5: Boxplot de tiempo medio de respuesta en el test Stroop	32
Figura 6: Boxplot porcentaje de aciertos en Word Recall	33
Figura 7: Boxplot porcentaje de aciertos en 1-Back	33
Figura 8: Boxplot porcentaje de aciertos en 2-Back	33
Figura 9: Boxplot porcentaje de aciertos en 3-Back	33
Tabla 1: Descriptivos de edad y IMC por grupo	31
Tabla 2: Grupo Control, pre-test, post- test y diferencial	31
Tabla 3: Grupo MICT, pre-test, post- test y diferencial	31
Tabla 4: Grupo HIFT, pre-test, post- test y diferencial	32

INTRODUCCIÓN

En los últimos 100 años, tanto la duración de la escolarización formal como su importancia para la prosperidad individual y social han aumentado rápidamente. La educación formal es cada vez más importante como resultado de una serie de elecciones individuales, cambios culturales y cambios legislativos significativos. Aunque a menudo se considera que la educación formal es la más importante para los resultados en el mercado laboral, también existen vínculos bien establecidos entre los logros educativos y la salud de las personas a lo largo de su vida. Por ejemplo, el nivel de estudios se correlaciona sistemáticamente tanto con el rendimiento cognitivo como con el riesgo de demencia en la edad adulta.

El deterioro cognitivo en las últimas etapas de la vida es un problema social cada vez mayor debido al envejecimiento de la población y al aumento de la esperanza de vida; las estimaciones sugieren que en 2050 habrá más de 130 millones de personas en todo el mundo con demencia (Prince et al., 2015). Y en España, el INE y el CIS, predicen que para 2037 el 26% de la población española tendrá más de 65 años (INEbase, 2022).

Dado que actualmente no existen terapias eficaces para modificar la enfermedad en la vejez, es crucial centrarse en factores preventivos posiblemente modificables, como la educación y el ejercicio. Sin embargo, la forma precisa y los orígenes de esta correlación determinarán la importancia de la relación entre el nivel educativo y la enfermedad y el funcionamiento en la vejez, tanto para la política de salud pública como para la teoría científica. ¿Influye una mayor escolarización en la función cognitiva en la edad adulta? ¿y el ejercicio? y si es así, ¿cómo? Si es así, ¿cuáles son los procesos y los moderadores? ¿El nivel educativo tiene un impacto en el desarrollo de las capacidades cognitivas en la edad adulta temprana, que luego se mantienen en la edad avanzada, o tiene un impacto en la tasa de cambio de las capacidades cognitivas durante la edad adulta tardía?

El nivel educativo es una variable complicada en muchos aspectos, y las conexiones entre éste y el rendimiento cognitivo pueden ser el resultado de diversos mecanismos causales.

Por ejemplo, el nivel educativo puede tener un efecto causal sobre el desarrollo cognitivo, de manera que el aumento de la duración de la educación formal se traduce en un aumento de las capacidades cognitivas; el nivel educativo puede ser el resultado de la capacidad cognitiva de una persona, de manera que las personas que tienen mejores capacidades cognitivas continúan con su educación; o, por último, los factores externos, como el estatus socioeconómico de la familia, pueden tener un impacto tanto en el nivel educativo como en el desarrollo cognitivo. La evidencia científica muestra que la relación entre el logro educativo y la función cognitiva en la edad adulta no es exclusiva del final de la vida, sino que se observa a lo largo de toda la edad adulta, incluida la edad temprana, independientemente de la relevancia relativa de estas diversas vías causales (Lövdén *et al.*, 2020). A estos mecanismos determinados por Lövdén, debemos añadir el ejercicio físico, ya que prácticamente todos los estudios que



analizan la interacción entre ejercicio y capacidad cognitiva, encuentran una fuerte influencia positiva de una variable sobre la otra. Aunque la mayoría de estos estudios se han centrado en los efectos del ejercicio crónico (referidos a intervenciones prolongadas) sobre las capacidades cognitivas, la investigación es bastante más escasa sobre los efectos agudos, es decir, que influencia podría tener una única sesión de ejercicio.



CAPÍTULO 1 : MARCO TEÓRICO

1.1. Estado cognitivo en el alumnado universitario

La actividad física es claramente beneficiosa en relación a diferentes patologías y se ha asociado constantemente con la reducción del riesgo de diabetes tipo 2, obesidad y enfermedades cardiovasculares (Janssen & LeBlanc, 2010; Li & Siegrist, 2012; Stanford & Goodyear, 2014). Además, estudios recientes han relacionado la actividad física con ventajas para el rendimiento cognitivo y académico de niños y adultos mayores (Esteban-Cornejo et al., 2015; Hillman et al., 2008; Northey et al., 2017).

A pesar de las ventajas de la actividad física, más del 80% de los adolescentes de hoy en día no siguen los requerimientos de actividad física (Piercy et al., 2018). La inactividad física se considera un grave peligro para la salud mental y física. La adolescencia y los primeros años de la edad adulta son momentos cruciales para la práctica de actividad física. Los procesos corticales superiores, o funciones ejecutivas (EF), que se encuentran en la corteza prefrontal, muestran un rápido desarrollo durante esta etapa (Lebel et al., 2008; Lenroot y Giedd, 2006). Cada vez hay más investigaciones que demuestran que el ejercicio mejora estos procesos ejecutivos (Li et al., 2017; Verburch et al., 2013; Xue et al., 2019). Además, la concentración y la velocidad de procesamiento podrían beneficiarse de la actividad física.

Estos dos procesos neurocognitivos fundamentales sirven como prerrequisitos para la aparición de las funciones ejecutivas. Además, las capacidades neurocognitivas son una condición necesaria para el aprendizaje efectivo (Brown y Blanton, 2002; Diamond, 2013), y las capacidades ejecutivas son cruciales para el éxito en muchas facetas de la vida (Diamond y Lee, 2011). La corteza prefrontal presenta las alteraciones más pronunciadas en términos de crecimiento cerebral, junto con la materia gris y blanca que continúa desarrollándose hasta los 30 años de edad (Lebel et al., 2008; Lenroot & Giedd, 2006; Tamnes et al., 2017; Whitford et al., 2007).

Por lo tanto, como estos procesos dependen en gran medida del funcionamiento del lóbulo frontal, los resultados cognitivos y el rendimiento académico podrían no estar optimizados y apoyados de manera óptima (Haverkamp *et al.*, 2020).

Se cree que la actividad física tiene varias vías fisiológicas que son ventajosas para los resultados cognitivos y el rendimiento académico. Una sola sesión de actividad física, también conocido como ejercicio agudo, aumenta el flujo sanguíneo cerebral y la secreción de neurotransmisores, lo que conduce a niveles más altos de excitación, atención y esfuerzo, que a su vez tienen un impacto positivo en el rendimiento de la tarea cognitiva poco después de participar en la actividad física (Best, 2010; Kashihara et al., 2009; Tomporowski, 2003). La actividad física repetida, a menudo conocida como actividad física crónica o ejercicio crónico, se ha relacionado con la neurogénesis, la sinaptogénesis y la angiogénesis (Best, 2010; Hillman et al., 2015; Ross et al., 2015). Estos ajustes morfológicos en la arquitectura del cerebro podrían mejorar



los resultados cognitivos y el rendimiento académico (Best, 2010). Una intervención persistente puede tener efectos más duraderos debido a los cambios estructurales resultantes (Haverkamp *et al.*, 2020).

La mayor parte de la bibliografía actualmente impresa se refiere a intervenciones agudas de actividad física para niños preadolescentes (Fedewa y Ahn, 2011; De Greeff *et al.*, 2018; Lees y Hopkins, 2013) o poblaciones de personas mayores (Angevaren *et al.*, 2007; Northey *et al.*, 2018). En lo que respecta tanto a las consecuencias del ejercicio físico crónico como al grupo de edad de los adolescentes y adultos jóvenes, se sabe relativamente poco (Li *et al.*, 2017; Verburgh *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2019). Además, la mayoría de los estudios hacen hincapié en los resultados cognitivos, mientras que solo un pequeño número detalla cómo las intervenciones de actividad física afectan al rendimiento académico (Haapala, 2012). Sin embargo, en los últimos diez años han empezado a aparecer nuevos estudios sobre estos temas.

Por lo tanto, es crucial obtener una comprensión profunda de cómo las intervenciones de actividad física aguda y crónica afectan a los resultados cognitivos y al rendimiento académico de los adolescentes y adultos jóvenes.

1.1.1. Estado actual y evidencias del rendimiento cognitivo

Las aptitudes cognitivas son determinantes para los logros vitales, la salud y la muerte. Estas capacidades pueden evaluarse tanto en la infancia como en la edad adulta (Batty, Deary y Gottfredson, 2007; Strenze, 2007). Los investigadores suelen distinguir entre dos grandes clases de capacidades cognitivas dentro de la psicometría y la psicología diferencial, especialmente en el contexto del envejecimiento (Baltes, Staudinger y Lindenberger, 1999). Las habilidades fluidas (FH) o mecánicas cognitivas son términos utilizados para describir las habilidades cognitivas que dependen principalmente de los componentes de procesamiento de la cognición. Estas habilidades incluyen la memoria, el razonamiento abstracto y la velocidad psicomotora. Las habilidades cristalizadas (CH), también conocidas como pragmáticas cognitivas, son habilidades cognitivas que reflejan principalmente el conocimiento declarativo y procedimental que se ha adquirido explícitamente del propio entorno sociocultural. Estas capacidades cognitivas incluyen el vocabulario, la alfabetización, los conocimientos numéricos, el conocimiento de la historia del mundo y de la actualidad, así como los conocimientos y habilidades de dominio especializados.

Muchas actividades requieren una combinación de habilidades fluidas y cristalizadas, tanto en el laboratorio como en la vida real. Las pruebas de fluidez de palabras, por ejemplo, en las que los participantes deben nombrar tantas palabras de una categoría determinada como puedan en el tiempo permitido, dependen tanto del conocimiento de las palabras como de habilidades fluidas como la velocidad de procesamiento (Salthouse, 2005).

Aunque los individuos pueden ajustar su dependencia de varios talentos a medida que envejecen y su equilibrio de puntos fuertes y débiles cambia, es probable que muchas tareas profesionales y vocacionales sofisticadas exijan una combinación de conocimientos temáticos especializados y habilidades fluidas.

La correlación entre todas las capacidades cognitivas, tanto fluidas como cristalizadas de una persona suele ser moderada (Spearman, 1904). Aún así, las disparidades que se muestran entre habilidades fluidas en las personas suelen ser estables en todas las capacidades cognitivas, y normalmente los que destacan en una capacidad también suelen tener altas capacidades en otras, y a la inversa.

El factor de inteligencia general, o el "factor G", puede utilizarse para explicar este patrón de relaciones positivas utilizando el análisis factorial (Carroll, 1993; Spearman, 1904). Aproximadamente la mitad de la diversidad en cada dominio de la capacidad cognitiva se explica por la inteligencia general.

Los investigadores que estudian el envejecimiento a veces se concentran en la "capacidad cognitiva general", o simplemente en la "capacidad cognitiva", en lugar de en una variedad de talentos cognitivos específicos, debido a los vínculos existentes entre los distintos dominios cognitivos.

1.1.2. Evaluación y predicción del rendimiento cognitivo

En neuropsicología clínica, los dominios de rendimiento cognitivo se utilizan habitualmente para describir y categorizar el rendimiento cognitivo. A menudo hay subdominios dentro de cada dominio, que corresponden a procesos de habilidad que forman parte de construcciones más amplias. Estos subdominios se utilizan para describir pruebas neuropsicológicas específicas, que miden una o más habilidades distintas. A pesar del acuerdo generalizado sobre la naturaleza de la mayoría de estas categorías, existen contradicciones flagrantes en la literatura clínica y científica. La mayoría de las discrepancias se producen en grandes áreas que pueden incluir varios procesos. A menudo no está claro si estos procesos se encuadran en dominios más generales (p.e. funcionamiento ejecutivo) o en un dominio más simple (p.e. velocidad de procesamiento). Originalmente, las partes del cerebro en las que se pensaba que se producían estos procesos estaban relacionadas con la génesis de estos dominios (es decir, localizadas) (Babcock, 1930), una perspectiva que sigue siendo importante hoy en día. Los conceptos modernos basados en los circuitos ponen un fuerte énfasis en cómo se activan e interactúan estos circuitos (López-García, 2016). La validez inherente de los dominios cognitivos en poblaciones distintas a las que sufren una lesión cerebral regional concreta, como la provocada por un accidente cerebrovascular, lesiones penetrantes o trastornos degenerativos localizados, es un problema adicional. Por ejemplo, los individuos con esquizofrenia y trastorno bipolar obtienen malos resultados en una serie de exámenes que anteriormente se crearon para investigar las actividades del cerebro regional (Harvey *et al.*, 2016).



Dominios de la estructura de la capacidad cognitiva global

Los dominios de la capacidad cognitiva pueden considerarse de diversas maneras. Por ejemplo, agrupándolos según el proceso global implicado, como el lenguaje, el funcionamiento ejecutivo, la memoria o la atención. Otros enfoques se basan en las funciones cerebrales regionales, deducidas de los estudios de lesiones, que identifican las funciones como procedentes del hipocampo, el lóbulo frontal, el lóbulo temporal, el lóbulo parietal u otras regiones. También existe una estructura organizativa jerárquica que depende de la complejidad de las operaciones. La suposición de que las funciones sensoriales y perceptivas básicas son las menos complicadas y que el funcionamiento ejecutivo, también conocido como pensamiento y resolución de problemas, es el más complejo, se denomina frecuentemente "top-down" versus "bottom-up" (Al-Aidroos, Said y Turk-Browne, 2012). Así, mientras que las actividades sensoriales simples sólo requieren una pequeña cantidad de procesamiento de nivel superior, las tareas de funcionamiento ejecutivo incluyen frecuentemente la coordinación de muchas funciones sensoriales, perceptivas, atencionales y otras menos sofisticadas.

a) Percepción y sensación

La capacidad de una persona para reconocer un estímulo que se manifiesta en una de las cinco modalidades sensoriales se denomina sensación. Las pruebas para detectar la presencia de visión, audición, tacto, gusto y olfato intactos entran en esta categoría. En consecuencia, las evaluaciones de la agudeza auditiva y visual pertenecen a esta categoría. Independientemente de la modalidad sensorial, la capacidad de reconocer un estímulo significativo pertenece al ámbito de la percepción. Los datos sensoriales se procesan e integran en el ámbito de la percepción. La identificación de cosas previamente encontradas a partir de datos sensoriales es una de las ideas de la percepción. La capacidad de distinguir objetos y sonidos, así como la integridad de los campos perceptivos, pueden utilizarse para evaluar la percepción (Harvey, 2019). Por ejemplo, la "negligencia" es el acto de no prestar atención a la totalidad de un área visual.

b) Habilidades motoras

Comprenden una serie de componentes fundamentales de la función motora. Incluyen habilidades más generales, como el equilibrio, y habilidades motoras finas, como la destreza manual y la velocidad motora.

Hay una serie de pruebas sistemáticas para las habilidades motoras, entre las que se incluyen como los golpes repetidos de dedos, las tareas de tablero de clavijas, (Tiffin y Asher, 1948), y las pruebas de fuerza de agarre (Reitan y Wolfson, 1985). Dado que pueden completarse exactamente de la misma manera con la mano dominante y la no dominante, varias de



estas actividades se utilizan para realizar pruebas generales de disfunción cerebral lateralizada.

Debido a su baja exigencia cognitiva, estas tareas son útiles para detectar problemas con las habilidades motoras fundamentales y el analfabetismo, ambos requisitos para la evaluación válida de las habilidades cognitivas más complejas que se mencionan a continuación.

c) Construcción

La capacidad de crear copias o dibujos de objetos cotidianos se conoce como construcción. Algunas conceptualizaciones de los procesos de producción visual los clasifican como pruebas perceptivas (Strauss, Sherman y Spread, 2006), mientras que otras, como Lezak, los clasifican como evaluaciones de habilidades motoras.

Además, existe un componente organizativo distintivo, lo que indica que las tareas también pueden requerir cierto funcionamiento ejecutivo. La parte de copia de la Figura Compleja de Rey (Corwin JL, 1993) y otras pruebas de dibujo incorporadas a otras tareas, como el Mini-Mental State Examination (MMSE)(Folstein, Folstein y McHugh, 1975) o la Evaluación Cognitiva de Montreal, son ejemplos de pruebas de construcción clásicas (MOCA)(Nasreddine *et al.*, 2005).

Numerosos paradigmas de dibujo de relojes también se consideran pruebas de construcción. Las personas con demencia, lesiones del hemisferio derecho y lesiones cerebrales parietales suelen presentar dificultades de construcción (Solomon *et al.*, 1998).

Estas pruebas son especialmente atractivas porque pueden completarse muy rápidamente y no requieren la comprensión de los requisitos de la tarea.

d) Concentración y enfoque

La atención selectiva y la atención sostenida son dos subdominios generales del concepto multidimensional de atención y concentración (o vigilancia). La atención sostenida es el término genérico utilizado para describir la concentración. Mientras que la atención dividida podría clasificarse como un tipo de atención selectiva.

Los componentes del funcionamiento ejecutivo están presentes en cada una de estas habilidades atencionales y se analizan a continuación.

d.1) Atención focalizada

Es el proceso de centrarse en la información pertinente y vital mientras se descarta otra información irrelevante. En las tareas de atención selectiva



se suele pedir al sujeto de la prueba que preste atención sólo a la información pertinente mientras se le presenta material de distracción.

En el caso de las tareas auditivas, las distracciones pueden presentarse con la voz del contrario, mientras que en las tareas visuales pueden marcarse simplemente como irrelevantes (color de la letra, tamaño, etc.) (Oltmanns, 1978; Harvey y Pedley, 1989).

La tarea global-local, que implica dos flujos de información paralelos y una figura enorme que generalmente es una letra (global) formada por letras individuales alternativas, es otro problema de atención selectiva. En general, los estímulos globales se reciben más rápidamente que los locales, del mismo modo que un lector reconoce más rápidamente las palabras que las letras individuales que las componen, tal como sucede en la incongruencia del test de letras-colores Stroops (Navon, 1977).

Esta actividad requiere la capacidad de responder a las instrucciones para cambiar entre los atributos globales y locales, que es un componente crucial que está comprometido en muchas poblaciones con problemas de control atencional (Harvey, 2019).

d.2) El procesamiento de doble tarea

Es otro paradigma de atención selectiva (Shiffrin y Schneider, 1984). El procesamiento de doble tarea implica dos flujos de entrada paralelos, como un flujo auditivo y uno visual, y el participante puede recibir instrucciones para priorizar el procesamiento de un flujo sobre el otro o para intentar optimizar el procesamiento de ambos flujos, por ejemplo el test de N-Back.

Existen medidas formales de la capacidad de división de la atención que pueden detectar deficiencias en esta capacidad que son típicas de muchas enfermedades neuropsiquiátricas (Granholm, Asarnow y Marder, 1996).

El paradigma de la tarea dual también puede utilizarse para evaluar la automaticidad de las tareas de los componentes. El procesamiento de la información que se realiza de forma automática puede llevarse a cabo sin un coste evidente de recursos (Norman y Bobrow, 1975).

Por lo tanto, se supondría que una tarea está automatizada cuando puede realizarse simultáneamente con una actividad secundaria sin afectar a la realización de la tarea principal. Los procedimientos controlados que necesitan recursos pueden llegar a automatizarse. Conducir es un ejemplo excelente de cómo el dominio de habilidades difíciles requiere el desarrollo de procesos automatizados (Engström *et al.*, 2017).

Los conductores principiantes son los que tienen un mayor índice de accidentes y pueden manejar muchas menos cosas a la vez sin dejar de rendir adecuadamente (Gershon *et al.*, 2017). La tasa de accidentes disminuye cuando se automatizan más tareas relacionadas con la conducción con la práctica.



Sin embargo, a medida que la gente envejece, los recursos se vuelven menos disponibles, y los conductores de mayor edad tienen más probabilidades de sufrir accidentes que los conductores más jóvenes y experimentados. Es interesante señalar que la conducción distraída, o el intento de realizar varias tareas a la vez mientras se conduce, es un factor importante que contribuye a los accidentes. La probabilidad de que una tarea secundaria esté relacionada con un accidente de tráfico aumenta con su complejidad (por ejemplo, enviar un mensaje de texto frente a utilizar un botón de control de la radio) (Harley, 2019).

El ejercicio del campo de visión útil (UFOV) sirve como medida especializada de la atención dividida o de la doble tarea. Para esta actividad es necesaria la detección simultánea de estímulos centrales y periféricos (Ball y Owsley, 1993). Se ha demostrado que el rendimiento del UFOV puede predecir los problemas de conducción, y que las intervenciones diseñadas para acelerar el procesamiento de la tarea dual pueden reducir las tasas de accidentes entre los conductores mayores (Roenker *et al.*, 2003).

e) Memoria

El dominio cognitivo más intrincado y diverso es el funcionamiento de la memoria. Existen varios subdominios y se han creado evaluaciones oficiales para la mayoría de ellos. Los examinaremos desde el enfoque ascendente que hemos utilizado hasta ahora.

e.1) Memoria Activa

Es la capacidad de almacenar conocimientos para su posterior aplicación de forma adaptable. Puede incluir tanto información verbal como no verbal, así como información procedente de todas las modalidades sensoriales. Además, la conceptualización de la memoria de trabajo incluye dos partes independientes: la manipulación y el mantenimiento de la información (Baddeley y Logie, 1999).

La memoria para la información lingüística, la información geográfica y otra información (incluida la información emocional) a través de muchos canales sensoriales se incluye en la memoria de trabajo de mantenimiento. La prueba cognitiva estándar para el mantenimiento de la memoria de trabajo es la tarea de amplitud de dígitos, que consiste en recordar una serie escalonada de dígitos más largos en orden. Al igual que distinguir entre un objeto que se acaba de ver y otro diferente que no se había visto antes, recordar la ubicación espacial de un objeto es una tarea (Harvey, 2019).

La memoria de trabajo de mantenimiento tiene una serie de componentes cruciales. La duración y la capacidad del almacenamiento icónico (visual) y auditivo (ecográfico) son limitadas, y el procesamiento de nueva información puede hacer que se pierda la memoria que ya está



almacenada. La memoria de trabajo puede utilizarse para trasladar la información a un almacenamiento a más largo plazo, aunque para ello es necesario un procesamiento activo o que la información sea lo suficientemente importante como para ser codificada en la memoria de trabajo. Múltiples modalidades sensoriales pueden procesar información simultáneamente en la memoria de trabajo de mantenimiento, pero su capacidad de almacenamiento es limitada para todos los tipos de información. La información que nunca se detecta de forma consciente puede almacenarse (procesamiento inconsciente), pero normalmente no puede recuperarse de forma voluntaria aunque esté disponible con la indicación implícita adecuada. El mantenimiento de la información en la memoria de trabajo requiere que la sensación, la percepción y la atención estén intactas (Harvey, 2019).

La manipulación de la memoria de trabajo es el proceso de realizar cambios en los datos que están almacenados en ella. La manipulación de la memoria de trabajo es una tarea estándar en la que se pide a los participantes que recuerden la información en orden inverso al de la presentación ("258"- "852"). La secuenciación numérica de letras (reordenación de números y letras en diferentes secuencias ("5B2A"-"AB25")) y la secuenciación de letras o números son ejemplos de variaciones sobre este tema. Del mismo modo, las directivas para recordar sólo una parte de la información entregada también pueden clasificarse de esta manera (Gold, 1997).

Los paradigmas de recuerdo parcial implican la adquisición de un conjunto completo de información y, a continuación, el recuerdo de sólo algunas secciones de la misma. Se diferencian de los paradigmas de atención selectiva con instrucciones previas (p. ej., una lista de colores y animales, y luego se le indica que responda sólo con animales después de que se haya presentado la lista). Para estas operaciones, generalmente hay un "coste de recursos", y el rendimiento en los dígitos hacia atrás es típicamente alrededor de un elemento menos que el rendimiento en el tramo de dígitos hacia adelante (6 dígitos hacia adelante = 5 dígitos hacia atrás). Los costes de capacidad aún más elevados se asocian a acciones más complicadas, como el almacenamiento de una variedad de objetos y la posterior recuperación de un conjunto elegido.

Existen otros componentes de la memoria de trabajo y técnicas de evaluación de la memoria de trabajo. Por ejemplo, los paradigmas de respuesta retardada (RR) pueden utilizarse para evaluar estímulos espaciales simples. Está demostrado que el SNC procesa de forma diferente la información verbal, espacial, de objetos, de localización, de acción y relacionada con la acción (Adcock *et al.*, 2000).

e.2) Memoria explícita, declarativa y episódica

Para codificar, retener y recuperar datos dentro y fuera del almacenamiento a largo plazo, este componente del sistema de memoria trabaja conjuntamente con las operaciones de almacenamiento de la



memoria de trabajo. Una vez más, los datos de la memoria pueden proceder de cualquier modalidad sensorial y ser verbales o no verbales. Así, la memoria episódica se refiere al recuerdo de acontecimientos cotidianos como lo que uno hizo la noche anterior o lo que había en su comida más reciente. Como se ha mencionado anteriormente, existen varias terminologías, y la discusión que sigue es aplicable a todas ellas (Harvey, 2019).

Por el contrario, la memoria procedimental (que se analiza a continuación) recuerda las habilidades necesarias para realizar tareas, como montar en bicicleta. Este tipo de procesamiento de la memoria consta de numerosas partes. Consisten en la codificación, el almacenamiento y la recuperación, todas ellas necesarias para un funcionamiento eficaz de la memoria. Para comprender los procesos que intervienen en estos ámbitos, es necesario tener en cuenta una serie de aspectos cruciales. Además, las deficiencias en otros componentes sistémicos pueden tener el mismo efecto global de un mal funcionamiento de la memoria (Harvey, 2019).

1.2. Efectos del ejercicio físico sobre el estado cognitivo

Los mecanismos hipotéticos por los que el ejercicio puede afectar a la función cognitiva podrían explicar esta diferencia. Se ha demostrado que el ejercicio aeróbico agudo aumenta el flujo sanguíneo en el cerebro (Querido, 2007; Ogoh, 2009). Es posible que se produzca un efecto similar tras el entrenamiento con sobrecargas. Sin embargo, mientras que los principales moduladores de la perfusión cerebral tras el entrenamiento aeróbico son la demanda neuronal, el gasto cardíaco y la presión parcial de dióxido de carbono arterial, se puede especular que en el entrenamiento con sobrecargas las variaciones del flujo sanguíneo se producen a través de oscilaciones o picos de presión arterial (Ogoh, 2009). Otro factor potencial está relacionado con las alteraciones del nivel de cortisol sérico. En un estudio (Tsai et al., 2014) midieron mayores concentraciones de la hormona del estrés después del entrenamiento con sobrecargas. Curiosamente, estos aumentos se asociaron con un mayor arousal, un estado psicofisiológico relacionado con estar despierto y atento, lo que, a su vez, podría influir en la función cerebral. Mientras que los procesos circulatorios (flujo sanguíneo, hormonas) parecen moderar los cambios en el rendimiento cognitivo inducidos por el ejercicio, la respuesta a largo plazo puede explicarse más bien por las adaptaciones estructurales. Se ha especulado que el entrenamiento con sobrecargas crónico desencadena la neurogénesis adulta, lo que se apoya en datos recientes. Por ejemplo, cuando Yarrow et al. (2010) examinaron la asociación entre el entrenamiento con sobrecargas y la expresión de BDNF detectaron concentraciones séricas elevadas de la sustancia inmediatamente después del entrenamiento. Además, tras 5 semanas de intervención, los aumentos de BDNF inducidos por el ejercicio fueron aún más pronunciados, lo que sugiere la importancia de este tipo de estímulos (Yarrow, 2010; Tsai et al. 2015), los niveles séricos más altos del factor de crecimiento insulínico 1 (IGF-1), que está relacionado con la neurogénesis y la sinaptogénesis (Nieto-Etévéz, 2016), se midieron después de una intervención de 12 meses de



entrenamiento con sobrecargas. Por último, Best et al. (2015) demostraron que 52 semanas de entrenamiento con sobrecargas redujo la atrofia de la materia blanca relacionada con la edad en mujeres mayores (Best et al. 2015).

Es necesario realizar más investigaciones para responder la pregunta de si el entrenamiento aeróbico podría ser ligeramente más eficaz o no que el entrenamiento de alta intensidad. Las mejoras agudas de la función cognitiva pueden ser de valor en diferentes contextos. Podría desempeñar un papel importante en la prevención de las lesiones deportivas porque, en la mayoría de las situaciones potencialmente traumáticas, los deportistas deben integrar y procesar una multitud de información sensorial a nivel supraespinal, desarrollando y ajustando planes motores bajo grandes limitaciones de tiempo. Los dominios cognitivos evaluados (especialmente el control inhibitorio y la flexibilidad cognitiva) representan factores clave dentro de este marco (Grooms et al., 2015). Además, aunque los datos de los ensayos prospectivos son todavía escasos, un estudio de Wilkerson (2012) descubrió que el tiempo de reacción neurocognitivo podía utilizarse para predecir las lesiones de las extremidades inferiores (riesgo relativo: 2,2). Además de ayudar a prevenir las lesiones musculoesqueléticas, las mejoras cognitivas inducidas por el entrenamiento con sobrecargas también podrían ayudar a los atletas a tomar decisiones relacionadas con el juego y, con ello, aumentar el rendimiento deportivo. En un estudio transversal Huijgen et al. (2015) demostraron que los jugadores de fútbol juvenil de élite mostraban una mayor flexibilidad cognitiva y mayor control inhibitorio en comparación con los jugadores de sub-élite. Fuera del ámbito deportivo, las sesiones de entrenamiento con sobrecargas agudas pueden ser útiles en entornos ocupacionales o académicos, ya que las habilidades relacionadas con el trabajo y el estudio, como la flexibilidad cognitiva, pueden aumentar con las pausas activas, es decir, durante los descansos laborales. También se sabe poco sobre la sostenibilidad de los efectos. Sólo dos de los 12 estudios incluidos en el meta-análisis de Wilke et al. (2015) realizaron una medición de seguimiento. En el primero de ellos, Pontifex et al. (2009) no encontraron mejoras de la función cognitiva a los 30 minutos después del entrenamiento con sobrecargas. El segundo ensayo, realizado por Johnson et al. (2016), encontró aumentos persistentes pero no significativos, aumentos a los 30 y 60 minutos en algunos resultados, que se atribuyeron a la alta variabilidad de los datos. Una de las mejores técnicas para mejorar las capacidades cardiorrespiratorias y metabólicas es el entrenamiento en intervalos de alta intensidad (HIIT), que alterna períodos de actividad intensa con períodos de recuperación de baja intensidad o pasivos (Gibala, 2012; Helgerud, 2007). Por ello, la aplicación del HIIT para mejorar los resultados relacionados con la salud ha despertado recientemente un nuevo interés (Kessler, 2012; Weston, 2014). Sin embargo, hay pocos datos sobre los efectos del HIIT en los resultados psicológicos relacionados con la salud mental (Stubbs et al. 2018; Martland, 2020). Numerosos estudios han examinado cómo afecta el HIIT a la función cerebral, pero sus resultados son a veces ambiguos y contradictorios (Coetsee, 2017; Santos-Concejero, 2017; So, 2017; Freitas, 2018; Robinson, 2018). De hecho, las investigaciones disponibles indican que el HIIT tiene un efecto beneficioso en el cerebro, especialmente en lo que respecta a la producción y la función de las neurotrofinas (Jiménez-Maldonado, 2018).



Es bien sabido que la proteína de 252 aminoácidos conocida como factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF) es esencial para mantener o mejorar una serie de funciones cerebrales, como la supervivencia y protección neuronal, la expresión de neuritas, el crecimiento y la remodelación axonal y dendrítica, la diferenciación neuronal y la plasticidad sináptica (Fernandes, 2017). Varios autores han explorado la respuesta del BDNF al ejercicio agudo, empleando varios protocolos de ejercicio e informando de diversos resultados (aumenta en relación con los niveles basales entre el 11,7 y el 410,0%). Sin embargo, es importante señalar que los protocolos utilizados en algunas de estas investigaciones no las hacen concluyentes, a lo que hay que añadir que existen otros estudios en los que no se han observado incrementos significativos en los niveles de BDNF tras esfuerzos de esta naturaleza (Laske, 2010; Rentería, 2020; Rojas-Vega, 2006). El ejercicio moderado o de alta intensidad induce mayores incrementos de BDNF.

Además, y en consonancia con descubrimientos anteriores (Lu, 2000), esta neurotrofina podría tener un papel en los procesos de memoria y aprendizaje. A la luz de esta teoría, se llevaron a cabo varias investigaciones para ver si el aumento de la concentración de BDNF tras el ejercicio podía mejorar el funcionamiento ejecutivo (EF). La memoria de trabajo (WM) es uno de los procesos mentales más cruciales que apoya la planificación, el razonamiento o la resolución de problemas (Diamond, 2013). La memoria de trabajo requiere mantener la información en la mente y trabajar con ella mentalmente, y también nos ayuda a utilizar el conocimiento conceptual y no sólo la información perceptiva para informar nuestros juicios. De hecho, después de una sola sesión de ejercicio, incluido el HIIT, varios estudios encontraron mejoras en las capacidades de EF y WM (Li, 2014; Smith, 2010; Tsukamoto, 2016; Verbickas, 2017). Otros, sin embargo, no han descubierto ninguna conexión entre las respuestas de la WM y del BDNF relacionadas con el ejercicio (Ferris, 2007; Chang, 2017).

Por otro lado, la capacidad de respuesta del eje hipotálamo-hipófisis-suprarrenal (HPA) está indudablemente conectada con una conocida respuesta al estrés del ejercicio. El eje HPA produce el corticosteroide cortisol (CORT), una hormona glucocorticoide generada por la corteza suprarrenal, como reacción al estrés (Henckens, 2012). El ejercicio de alta intensidad y duración prolongada da lugar a las mayores liberaciones de CORT, ya que las respuestas de CORT al estrés provocado por una sesión aguda de ejercicio están bien documentadas (Fragala, 2011) y sus elevaciones en la circulación son proporcionales a la gravedad del estrés inducido por el ejercicio. Además, investigaciones anteriores han demostrado que la CORT y la EF tienen una conexión en forma de U invertida, con niveles modestos de este glucocorticoide correlacionados positivamente con mejoras en la EF (Blair, 2005). Pero investigaciones más recientes (Heaney, 2013) han revelado una correlación inversa entre la CORT derivada del ejercicio y la EF.

Al analizar el posible impacto del ejercicio agudo en la mejora del rendimiento cognitivo, hay que tener en cuenta ciertos elementos. En primer lugar, a pesar de que el funcionamiento ejecutivo alcanza su punto óptimo de desarrollo en la edad adulta joven, cada vez hay más pruebas de que el ejercicio aeróbico puede seguir siendo ventajoso para este tipo de funcionamiento (Ludyga, 2016). Sin



embargo, es importante comprender los efectos agudos del ejercicio de alta intensidad en la WM y descubrir una función potencial para el BDNF y el CORT. Por otra parte, varios estudios han utilizado el ejercicio aeróbico como estímulo para la EF.

Con el fin de determinar el impacto de una sesión aguda de HIIT en la MMC en adultos jóvenes sanos, la presente investigación se centró en los marcadores neurofisiológicos y de estrés subyacentes. Predijimos que el estrés provocado por una sesión aguda de HIIT aumentaría la WM al tiempo que mantendría altas cantidades de BDNF y CORT circulantes, lo que llevaría a una desviación del patrón neurofisiológico observado anteriormente.

Predijimos que la intervención basada en el HIIT daría lugar a una notable reacción de la BDNF y la CORT, así como a una mejora de la capacidad de la MM. Además, este período de actividad vigorosa dio lugar a un aumento significativo tanto de la frecuencia cardíaca (FC) como de la escala de esfuerzo percibido (RPE), que alcanzó niveles cercanos al máximo. Estos hallazgos son en cierto modo coherentes con los que presentaron Rozenek et al. (2016), quienes informaron de valores para la FC máx. y el porcentaje medio de FC que eran comparables a los obtenidos aquí. Sin embargo, en comparación con lo que estos autores habían señalado anteriormente, las estadísticas de RPE medidas en la presente investigación fueron marginalmente mayores.

Antes de discutir cómo afecta el HIIT a la respuesta del BDNF, es importante llamar la atención sobre las sorprendentes variaciones íter-individuales en los niveles de BDNF en reposo que han sido documentadas por investigaciones anteriores, que han demostrado un amplio rango de concentración plasmática (de 10,3 a 2500 pg/mL) (Nofuji, 2008). Sin embargo, en el estudio de Martínez-Díaz et al. (2020) los niveles plasmáticos de BDNF registrados fueron de $424,66 \pm 91,05$ pg/mL, que se encontraban en el rango normal mencionado anteriormente; pero se observaron menos diferencias íter-individuales, principalmente porque la muestra era homogénea en términos de edad, índice de masa corporal, nivel de fitness y ausencia de enfermedades metabólicas, neurológicas e inmunológicas. Cuando se tuvieron en cuenta los datos previos al ejercicio, se observó un aumento significativo (alrededor del 200%) en los niveles plasmáticos de la neurotrofina BDNF sólo después del ejercicio.

Dado que investigaciones anteriores han mostrado aumentos de hasta el 400% tras el ejercicio vigoroso (Winter, 2017; Rojas-Vega, 2006; Ferris, 2007; Tang, 2008; Knaepen, 2010) en la concentración de BDNF en plasma podría considerarse moderado. Sin embargo, resulta interesante que el análisis de la latencia del BDNF durante el periodo de recuperación (30 minutos después del ejercicio) revelara un descenso drástico de los niveles plasmáticos de BDNF (superior al 65%), manteniéndose por encima de los niveles previos al ejercicio. Gustafsson et al. (2009) informaron de aumentos del 398% en los niveles circulantes de BDNF después de un ejercicio agotador. En el presente estudio, los niveles plasmáticos de BDNF evaluados 30 minutos después del ejercicio también disminuyeron drásticamente (curiosamente, en aproximadamente un 65%), volviendo casi a los niveles observados antes de la intervención. En otro estudio, los investigadores encontraron que los niveles de BDNF disminuyeron significativamente y cayeron por debajo de los niveles previos al ejercicio 30



minutos después de la actividad severa (Laske, 2010). Parece que el tiempo de latencia del BDNF reactivo al estrés generado por el ejercicio rara vez supera los 15 minutos porque numerosas investigaciones (Schmolecky, 2013; Rojas-Vegas, 2006; Tang, 2008) también han descubierto que el BDNF tiene una vida media corta en la circulación periférica. El protocolo de ejercicio (por ejemplo, la intensidad, la duración, los periodos de recuperación y el dispositivo ergométrico), las características de los sujetos (por ejemplo, el sexo, la edad, si están sanos o son pacientes, el estilo de vida sedentario o activo) y la evaluación bioquímica (por ejemplo, las muestras de saliva, suero o plasma, el método de ensayo y la precisión del ensayo) podrían contribuir a estas variaciones en la respuesta del BDNF.

La teoría de la U inversa respalda los efectos favorables de la excitación moderada sobre el rendimiento cognitivo; sin embargo, la cantidad de excitación después del ejercicio está altamente correlacionada con el grado de intensidad del mismo. En consecuencia, el método más eficaz a corto plazo para mejorar el rendimiento cognitivo es el ejercicio aeróbico de intensidad moderada (60-80% de VO₂ máx o FC máx.) (Li, 2014; Kashiara, 2009). La misma teoría se ha utilizado para explicar las posibles relaciones entre la CORT y el funcionamiento ejecutivo, ya que los niveles moderados de CORT se asocian positivamente con el funcionamiento ejecutivo y se ha demostrado que los niveles muy elevados de CORT interfieren con las funciones cognitivas, como el control inhibitorio, la regulación de la atención y la WM, que dependen en gran medida de las redes prefrontales (Quesada, 2012). Por contra, encontramos estudios que demuestran que el HIIT puede aumentar la capacidad de la WM en adultos jóvenes sanos sin afectar a la respuesta de la CORT al ejercicio intensivo, en contraste con la teoría de la U inversa y otros estudios que llegan a la misma conclusión (Martínez-Díaz, 2020; Smith, 2010). Sin embargo, y de acuerdo con investigaciones mencionadas anteriormente, tanto el ejercicio de intensidad moderada (MIE) como el HIIT pueden mejorar la EF.

Los hallazgos de varias investigaciones muestran un aumento significativo de los niveles de CORT 15 minutos después de un entrenamiento extenuante (Martínez-Díaz, 2020; Rojas-Vega, 2006; Tanner, 2014). De hecho, y de acuerdo con otras investigaciones, la liberación de CORT puede seguir aumentando hasta 30 minutos después de un ejercicio extenuante (anaeróbico) (Kraemer, 2005).

1.2.1. Situación actual de las intervenciones para la mejora del estado cognitivo

En teoría, la influencia del ejercicio en la función cognitiva se ha determinado que sigue una relación de U invertida, similar a la teoría de la arousal descrita originalmente por Yerkes y Dodson (1908), que fueron los primeros en teorizar que a medida que aumenta la intensidad del ejercicio, la función cognitiva mejora hasta que se sobrepasa una intensidad crítica en la que la función cognitiva se vería perjudicada. Sin embargo, la evidencia científica ha demostrado que los efectos agudos del ejercicio aeróbico de intensidad moderada afectan positivamente sobre la función cognitiva (Lambourne y Tomporowski, 2010; Chang et al. 2012), mientras que los estudios que examinan



la influencia del ejercicio de alta intensidad informan de resultados ambiguos (Browne et al. 2017; Moreau y Chou 2019), demostrando tanto resultados positivos (Tsai et al. 2014; Chang et al. 2017) como inhibidores (Mekari et al. 2015; Smith et al. 2016) en la función cognitiva.

Por ejemplo, se ha demostrado que el ejercicio de alta intensidad provoca cambios drásticos en el metabolismo cerebral (Dietrich y Audiffren 2011; Mekari et al. 2015,) provocando elevadas concentraciones neuroquímicas (Izquierdo et al. 2009; Dietrich y Audiffren 2011; Tsai et al. 2014) que se cree que median negativamente en las funciones cognitivas. Anders et al. (2021) entienden que un importante estrés físico asociado con un protocolo de ejercicios de sobrecargas de alta intensidad (6 series de 10 RM con 2 minutos de descanso entre series) podría provocar este efecto inhibitor sobre las funciones cognitivas, relacionado con la dramática respuesta de señalización de estrés y los altos niveles de estrés metabólico glucolítico (Kraemer y Ratamess 2005; French et al. 2007; Izquierdo et al. 2009). Aunque, lo que llama la atención de estos estudios es la escasez de datos que examinan sobre los ejercicios de alta intensidad y la necesidad de más contexto para entender las conclusiones de los trabajos sobre el ejercicio de alta intensidad (Chang et al. 2012; Browne et al. 2017; French et al. 2007).

Estudios anteriores han demostrado también una disminución del rendimiento tras el ejercicio de alta intensidad (Wang et al. 2013; Mekari et al. 2015; Smith et al. 2016). Por ejemplo, Mekari et al. (2015) examinaron el procesamiento de la información y la función ejecutiva utilizando una prueba de Stroop modificada durante baja (40% de la potencia máxima), moderada (60%), y de alta intensidad (85%). Encontraron un aumento significativo del tiempo de reacción (es decir, una respuesta más lenta) y una reducción significativa de la precisión en el grupo de ejercicio de alta intensidad en comparación con el grupo de baja intensidad. Wang et al. (2013) informaron de disminuciones significativas en las medidas de la función ejecutiva determinadas por el Wisconsin Card Sorting Test durante un ejercicio de ciclismo al 80% de la HRR en comparación con el ciclismo al 30% de la HRR, al 50% de la HRR y en reposo. Además, Smith et al. (2016) demostraron que los tiempos de reacción más lentos, tasas de error, tasas de omisión, y error de decisión en una prueba Go/No-Go corriendo en una cinta rodante a alta intensidad (80% HRR) cuando se comparaba con intensidad moderada (70% HRR) y con condiciones de reposo.

Los datos del estudio de Anders et al. (2021) mostraron un patrón de respuesta muy variable en las funciones cognitivas como consecuencia del ejercicio de sobrecargas de alta intensidad. Lo que implica que hubo un deterioro de rendimiento en un dominio cognitivo asociado a la memoria y el recuerdo, pero mejor rendimiento en los dominios cognitivos asociados a las habilidades computacionales básicas. Esta inhibición de la respuesta exhibida indica que el ejercicio de resistencia de alta intensidad puede provocar respuestas diferenciales únicas en varios dominios cognitivos. Browne et al. (2017) proporcionaron una caracterización simplificada de los diversos dominios cognitivos, sugirieron que las pruebas que evalúan el tiempo de reacción y el procesamiento de la información, representan un dominio cognitivo general, y



las pruebas que evalúan la función ejecutiva, la atención y la memoria; representan un dominio cognitivo complejo. Cada vez hay más pruebas que sugieren que los cambios inducidos por el ejercicio pueden ser específicos de cada dominio (Audiffren et al. 2008, 2009; Browne et al. 2017; Chang et al. 2017). Por ejemplo, Audiffren et al. (2008, 2009) examinaron la influencia de un ejercicio en cicloergómetro al 90% del umbral ventilatorio durante 35 minutos en de tareas cognitivas simples y complejas. En el primer estudio, Audiffren et al. (2008) utilizaron una prueba auditiva simple de dos opciones y reportaron mejoras significativas en el tiempo de reacción durante el protocolo de ejercicio. Sin embargo, en el estudio posterior Audiffren et al. (2009) utilizaron una prueba de generación de números aleatorios para evaluar la función ejecutiva e informaron de que en comparación con el descanso, los participantes mostraron un cambio en su estrategia de generación de números aleatorios. Además, Chang et al. (2017) utilizaron una prueba Stroop que evaluaba la función ejecutiva (inhibición de la respuesta) e informaron de mejoras significativas en el tiempo de reacción en comparación con el grupo de reposo, pero no encontraron diferencias en el tiempo de reacción para la tarea incongruente después de 3 series de 8-10 repeticiones al 80% de 1RM para 7 ejercicios de entrenamiento de sobrecargas. Por lo tanto, las mejoras en las tareas cognitivas simples, en particular el tiempo de reacción y el procesamiento de la información, con el deterioro concomitante de una tarea cognitiva compleja, en particular la memoria y el recuerdo, en el presente estudio sugieren que el entrenamiento de sobrecargas de alta intensidad puede provocar diferencias en el rendimiento cognitivo.

Wilke et al. concluyen en un meta-análisis muy profundo sobre el efecto agudo del ejercicio sobre la función cognitiva, que el ejercicio de sobrecargas parece ser un método apropiado para mejorar de forma aguda la función cognitiva en adultos sanos. La literatura analizada muestra que varias semanas de entrenamiento con sobrecargas parecen inducir mejoras moderadas en la función cognitiva, que una sola sesión de ejercicios con sobrecargas produce mejoras moderadas en la función cognitiva en comparación con un grupo control sin ejercicio, y que los efectos agudos del ejercicio de resistencia no son superiores a los que se producen después de ejercicio aeróbico. Aunque finalmente, recomiendan que se necesitan más estudios que diluciden claramente el impacto de los modificadores del efecto agudo, como la edad, la intensidad o la duración del entrenamiento (Wilke et al., 2019).

La evidencia acumulada sugiere que la aparición de adaptaciones cerebrales inducidas por el entrenamiento pueden ayudar a prevenir o retrasar el deterioro cognitivo y las enfermedades neurodegenerativas; según los datos de los experimentos con animales, el ejercicio crónico promueve la plasticidad sináptica, la angiogénesis y la neurogénesis (Vayman, 2016; Thomas, 2012; Liu, 2018). Además, los estudios en humanos han demostrado un aumento de la expresión del factor neurotrófico (BDNF), así como el aumento del volumen cerebral del hipocampo, en respuesta a varias semanas de entrenamiento (Kandola, 2016). Estos cambios descritos en el cerebro inducidos por el ejercicio parecen desembocar en un mayor rendimiento cognitivo. Esto tiene sentido porque, por ejemplo, la angiogénesis permite aumentar la perfusión, tanto el



aprendizaje como la memoria a largo plazo están vinculados al hipocampo (Howland, 2008).

Numerosas investigaciones, tanto en humanos como en animales, han documentado los efectos positivos del ejercicio en los procesos mentales y cognitivos. Por lo tanto, el ejercicio está recibiendo más atención en los estudios como un potencial componente del estilo de vida para mejorar las capacidades neurocognitivas y prevenir o retrasar la demencia (Cotman et al., 2007; Hillman et al., 2008).

Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones se han centrado en los efectos a largo plazo del ejercicio, mientras que los estudios sobre los efectos a corto plazo del ejercicio en la cognición sólo han empezado a recibir más atención recientemente (Tomprowski, 2003). Investigaciones recientes demuestran que una sesión aguda de ejercicio aeróbico moderado mejora la función cognitiva en tareas de conflicto, como las pruebas de flanqueo de Eriksen y Stroop, así como en tareas de reacción de elección (Chmura et al., 1998; Collardeau et al., 2001). (Hogervorst et al., 1996; Kamijo et al., 2004, 2007).

El estudio de los impactos cognitivos del ejercicio agudo ha acelerado la búsqueda de sus fundamentos cerebrales, especialmente en el ámbito de la investigación del potencial relacionado con eventos (ERP). El P300 (o P3) se considera un sustrato neural ideal para un mejor rendimiento cognitivo, ya que se cree que representa la actividad cerebral necesaria para mantener la memoria de trabajo cuando se actualiza el modelo mental del entorno de los estímulos (Donchin y Coles, 1988). Numerosos estudios (Hillman et al., 2003, 2008; Kamijo et al., 2004, 2007; Magnie et al., 2000; Nakamura et al., 1999; Polich y Lardon, 1997) han mostrado, en general, un aumento de la amplitud y un acortamiento de la latencia de los componentes P300 en relación con las mejoras en el rendimiento provocadas por una sesión aguda de ejercicio.

Aunque la ERP ofrece información muy temporal sobre la actividad cerebral, sólo ofrece una comprensión generalizada del lugar del cerebro donde se originó el efecto. El uso de varias técnicas de neuroimagen podría ser útil para investigar qué regiones cerebrales alteran su activación en respuesta al ejercicio. Introducimos la espectroscopia funcional del infrarrojo cercano (fNIRS), un método óptico que monitoriza de forma no invasiva la hemodinámica cerebral midiendo los cambios en la atenuación de la luz del infrarrojo cercano que atraviesa el tejido (Koizumi et al., 2003; Obrig y Villringer, 2003; Villringer y Chance, 1997). La fNIRS es una técnica de neuroimagen prometedora para examinar los efectos agudos del ejercicio sobre la cognición. Utilizando la estrecha relación entre la actividad neuronal y el flujo sanguíneo cerebral local, la fNIRS ha demostrado tener éxito en la detección de los cambios de oxigenación en respuesta a las actividades corticales en numerosas investigaciones. A diferencia de otras técnicas de neuroimagen, la fNIRS es portátil, sólo necesita pequeños montajes experimentales y es sencilla de configurar en un gimnasio (Timinkul et al., 2008).

La intensidad del ejercicio para cada persona es un aspecto crucial que hay que gestionar. Recientes investigaciones de ERP y estudios conductuales han revelado que la intensidad del ejercicio afecta de forma diferente a los efectos del ejercicio agudo en la respuesta cerebral y el rendimiento cognitivo: En la



mayoría de los casos, la intensidad moderada produce los mejores resultados (Kamijo et al., 2004, 2007). Sin embargo, dependiendo del nivel de condición física de una persona, la misma cantidad de esfuerzo físico tendrá efectos variados en cada sujeto.

Para la evaluación de la atención, la tarea Stroop de coincidencia de colores y palabras como tarea cognitiva está ampliamente estudiada en combinación con una variedad de técnicas de neuroimagen, incluyendo fNIRS (Ehlis et al., 2005; Schroeter et al., 2002, 2003, 2004b), y además las regiones del cerebro asociadas con la tarea son bien conocidas (MacLeod, 1991). En la tarea Stroop de emparejamiento de colores y palabras, se pide a los participantes que identifiquen el color de la tinta suministrada tras observar los nombres de varios tonos. En la condición incongruente, los nombres de los colores se presentan en colores no coincidentes, como la palabra verde en color roja, mientras que en la condición congruente, los nombres de los colores se presentan en color y significado coincidentes, como la palabra verde en color verde, mientras que en la condición neutra, las letras no coloridas se presentan en cualquier color, como las letras XXXX en tinta roja. La interferencia Stroop es un efecto competitivo que se produce cuando dos fuentes de información de color son incompatibles. Se observa con mayor frecuencia como un tiempo de reacción más largo en situaciones neutras o congruentes que durante la condición incongruente (Laird et al., 2005).

Siguiendo esta metodología de evaluación Yanasigawa et al. (2010), investigaron las áreas del córtex en las que una sesión aguda de ejercicio moderado provocaba alteraciones en la actividad de la región de interferencia Stroop. Una vez comparado el patrón de activación cortical durante la tarea Stroop de emparejamiento de colores y palabras antes y después de la tanda aguda de ejercicio moderado utilizando un fNIRS multicanal relacionado con eventos dirigido al córtex prefrontal lateral (LPFC).

En este estudio, utilizaron por primera vez datos de fNIRS para evaluar las bases neurales de una sesión aguda de ejercicio moderado sobre la cognición. La intensidad del ejercicio en todos los sujetos se controló estrictamente al 50%Vo₂ pico. Los resultados confirmaron que el efecto Stroop podía detectarse de forma persistente en las condiciones utilizadas en este experimento, incluso después de una sesión aguda de ejercicio moderado, basándonos en mediciones conductuales que mostraban un tiempo de respuesta más corto en la condición neutra en comparación con la condición incongruente.

Sobre la base de este hallazgo, Yanasigawa et al. (2010) investigaron el impacto de una sesión breve y moderada de ejercicio sobre la interferencia Stroop y encontraron que el rendimiento mejoró. Esto concuerda con un estudio anterior que encontró que el ejercicio agudo aumentaba la interferencia Stroop (Hogervorst et al., 1996).

Los fundamentos neurológicos de que una sesión aguda de ejercicio moderado de lugar a un aumento de la función cognitiva para hacer frente a la interferencia de Stroop parecen encontrarse en los estudios de Banich et al. (2000, 2001) que revisaron la actividad del LPFC relacionada con la tarea Stroop y plantearon la hipótesis de que la activación podría reflejar el procesamiento de la interferencia en la respuesta. Por ello la activación del LPFC podría verse como



un sustrato neuronal que genera el rendimiento cognitivo mejorado en la prueba Stroop. Casualmente, el aumento de la activación del LPFC se da también después de una sesión aguda de ejercicio moderado. Este hallazgo proporciona el primer apoyo experimental para la base neural de la mejora del rendimiento cognitivo después de una sesión aguda de ejercicio moderado. En un nivel más fisiológico, el estado de excitación elevado también puede atribuirse a un aumento de la liberación de catecolaminas en el sistema nervioso central (noradrenalina, etc.)(SNC). Pagliari y Peyrin proponen una relación entre los niveles de catecolaminas centrales y la activación del SNC en ratas que hacen ejercicio (1995). Según estos autores, la actividad noradrenérgica central puede ser la causa de la mejora mental durante el ejercicio.

Dados los hallazgos de estos estudios, resulta tentador plantear la hipótesis de que la mejora de la función cognitiva (en concreto la atención) inducida por el ejercicio agudo puede tener implicaciones a largo plazo. Según los datos de neuroimagen, las sesiones de ejercicio crónico mejoran el rendimiento de las regiones corticales, incluido el LPFC, cuando los sujetos completan el paradigma Eriksen flanker, una tarea de interferencia cognitiva comparable al paradigma Stroop (Colcombe et al., 2004). Sería ventajoso utilizar un seguimiento longitudinal de neuroimagen para cerrar la brecha entre los efectos agudos y crónicos del ejercicio moderado en el rendimiento cognitivo.

Aunque hasta la fecha, la mayoría de los estudios que examinan los efectos de la actividad física sobre la función cerebral han utilizado el ejercicio de tipo aeróbico. Varios meta-análisis, que incluían intervenciones tanto agudas como crónicas, detectaron mejoras pequeñas o moderadas en ámbitos como la velocidad de procesamiento, atención, función ejecutiva y memoria (Colcombe, 2016; Smith, 2010; Hidin, 2012; MccMorris, 2011; Chang, 2012; Ludyga, 2016; Groot, 2016; Firth, 2016; Northey, 2018; de Greeff, 2018; Song, 2018). Northey et al. (2018) pudieron agrupar los resultados de 13 ensayos; los autores informaron de efectos moderados del ejercicio de sobrecargas sobre la función ejecutiva, la memoria y la memoria de trabajo. De las únicas revisiones sistemáticas de la literatura sobre los efectos de una única sesión que examinan esta cuestión, encontramos que es bastante antigua (Sibley, 2003), no proporcionó una síntesis de datos cuantitativos y se centra en una muestra de niños.

Los expertos han estudiado ampliamente el impacto del ejercicio agudo (una sola sesión de ejercicio) en la memoria y revisando la bibliografía más relevante, muchas de las investigaciones sobre los efectos de una única sesión de ejercicio sobre la función cognitiva revelaron un tamaño medio del efecto muy bajo ($SMD=0,22$) (Roig et al., 2013). Los análisis de los factores moderadores revelaron que los efectos eran mayores para las medidas de la memoria a largo plazo ($DME=0,52$) que para las medidas de la memoria a corto plazo ($DME=0,26$). Aunque posteriormente a las investigaciones de Roig en 2013, se ha demostrado que el ejercicio agudo mejora las funciones cognitivas, sin embargo necesitamos dilucidar los factores clave que sustentan estos efectos.

La forma en que el momento del ejercicio en relación con la exposición a la información "a recordar" afecta a los efectos del ejercicio en la memoria a corto y largo plazo es un tema intrigante sobre el que hay que reflexionar. Según



Loprinzi et al. (2017), varios mecanismos cerebrales subyacen a la codificación, la consolidación y la recuperación; por lo tanto, parece lógico suponer que el momento de la administración del ejercicio en relación con estos procesos puede diferir en cómo afecta a la memoria a corto y largo plazo.

Los resultados del ejercicio realizado antes de la exposición y del ejercicio realizado después de la exposición se han estudiado en varias investigaciones. El rendimiento de la memoria a largo plazo fue evaluado por Labban y Etnier (2011) en grupos que se ejercitaron antes de la exposición, después de la exposición o no se ejercitaron. Según sus conclusiones, el grupo que hizo ejercicio antes superó considerablemente al grupo de ejercicio posterior, y demostró una tendencia a mejorar el rendimiento en comparación con el grupo de control y el grupo de ejercicio posterior. Estos resultados les llevaron a la conclusión de que el ejercicio, cuando se administra antes de la exposición, ayuda tanto a la codificación como a la consolidación y, en consecuencia, ofrece los mejores beneficios para la memoria a largo plazo.

Para responder a esta cuestión de investigación, Salas, Minakata y Kelemen (2011) evaluaron la memoria a largo plazo en relación con la exposición al ejercicio. Emplearon un diseño completo con 4 grupos (ejercicio antes de la exposición, ejercicio antes y después de la exposición, ejercicio después de la exposición, y grupo control sin ejercicio) y una prueba de memoria. Los dos grupos que hicieron ejercicio antes de la exposición obtuvieron mejores resultados que los otros dos grupos, según su informe de efecto principal. Esto es consistente con la idea planteada por Roig et al. (2016) de que la actividad física antes de la codificación puede maximizar las ventajas de la memoria.

Curiosamente, en comparación con el grupo control sin ejercicio, el ejercicio antes y después de la exposición tuvo el mayor tamaño del efecto ($ES=0,75$). Los resultados también podrían atribuirse a las variaciones en la duración del ejercicio, dado que el grupo de ejercicio antes de la exposición había acumulado 10 minutos de caminata y el grupo de ejercicio antes y después de la exposición tuvo un total de 20 minutos de caminata antes del recuerdo, lo que hace imposible atribuir este efecto a la provisión de ejercicio tanto antes como después del ejercicio. Es importante destacar que los hallazgos de Labban, Etnier y Salas et al. así como los de Labban y Salas et al. implican que el ejercicio antes de la exposición mejora el rendimiento de la memoria, mientras que las cuestiones del tiempo total de ejercicio y la provisión de ejercicio antes y después de la exposición siguen sin respuesta. La desventaja que tuvieron todos estos estudios fue que la memoria a largo plazo sólo se evaluó poco después de que terminara la sesión de ejercicio. Debido a esto, es difícil interpretar los resultados del grupo que hizo ejercicio después de la exposición porque la medida de recuerdo retardado del ejercicio se evaluó inmediatamente después. Es probable que el ejercicio obstaculizara el proceso de consolidación porque el rastro de memoria podría estar todavía en una condición frágil (Roig et al., 2016).

En investigaciones más recientes, Sng et al. (2018) y Labban y Etnier (2018) mostraron que el grupo de ejercicio previo superó una vez más al grupo de ejercicio posterior cuando se midió la memoria a largo plazo después de un retraso mayor tras la exposición a la tarea de memoria. Sng et al. (2018)



dividieron a los participantes en un grupo control o en una de las tres condiciones de ejercicio de 15 minutos utilizando una metodología cuasi-experimental (antes, durante o después de la exposición). El grupo que realizó el ejercicio previamente a la evaluación recordó notablemente más palabras que los otros dos grupos de ejercicio veinte minutos después de la exposición. Los resultados para el reconocimiento y la atribución 24 horas después de la exposición revelaron que tanto el grupo de control como el grupo de ejercicio previo se desempeñaron notablemente mejor que el grupo de ejercicio posterior. Labban y Etnier (2018) examinaron el rendimiento de la memoria a largo plazo bajo dos condiciones de ejercicio de 30 minutos y una condición de control (antes o después de la exposición). La condición de ejercicio previo produjo considerablemente mayor recuerdo de palabras que la condición de control, tanto 60 minutos como 24 horas después de la exposición. Los resultados sugieren de nuevo que el ejercicio previo a la exposición produce los mayores beneficios para la memoria a largo plazo en comparación con las condiciones de control, ejercicio durante la exposición y ejercicio después de la exposición. Estos resultados son consistentes con las expectativas de que los beneficios del ejercicio pueden ser observados incluso después de periodos relativamente largos.

Profundizar en la comprensión de los mecanismos que subyacen a la forma en que el ejercicio influye en el procesamiento de la memoria es otra área importante de investigación, además de investigar las cuestiones relacionadas con el momento en que se debe realizar el ejercicio para obtener las mayores ventajas para la memoria. Para responder a esta cuestión, examinamos el conjunto de investigaciones sobre las regiones del cerebro que son importantes para la función de la memoria. Cuando se busca influir en los resultados del rendimiento con intervenciones a corto plazo, como el ejercicio, puede ser útil comprender el procesamiento de la memoria evaluado por técnicas de neuroimagen, como la resonancia magnética funcional (RMF). El ejercicio agudo afecta a la sensibilidad de la memoria episódica (recuerdo de momentos, lugares, emociones y detalles de contexto) a la hora de codificar y recuperar información espacio-temporal, como escuchar y recordar una lista de palabras o un párrafo (Roig et al., 2013). Aunque el hipocampo y otros componentes del lóbulo medio-temporal (MTL) son ampliamente conocidos por su función en la memoria episódica (Dickerson y Eichenbaum, 2010), otras regiones del cerebro también participan en el procesamiento de la memoria (Eichenbaum, 2017). En particular, la corteza prefrontal dorsolateral y la corteza parietal dorsal han sido identificadas por sus funciones en la memoria episódica y en la interacción entre la memoria episódica y la atención (Blumenfeld y Ranganath, 2007; Lepage et al., 2000; Cabeza, 2008; Uncapher y Wagner, 2009). Es interesante observar que se ha demostrado que el ejercicio agudo afecta a la actividad neural en las regiones de la memoria en tareas de memoria no episódica. Este hallazgo puede indicar que el ejercicio apoya el procesamiento de la información, como recordar las instrucciones y los objetivos de una tarea, lo que puede mejorar el rendimiento cognitivo. Se ha demostrado que el ejercicio agudo afecta específicamente a la activación, medida por los cambios en la señal dependiente del nivel de oxígeno en sangre (BOLD) con fMRI, en la MTL y las regiones parietales (Chen et al., 2016, Metcalfe et al., 2015), regiones frontales (Li et al., 2014). Las alteraciones en la activación y los cambios en la activación inducidos



por el ejercicio solo se han asociado ocasionalmente con mejoras en el rendimiento (Chen et al., 2016; Yanagisawa et al., 2010; Metcalfe et al., 2015), esto sugiere que se apoyan los procesos neurales que influyen en los resultados conductuales posteriores. Hasta donde sabemos, el impacto del ejercicio agudo en la activación cerebral medida por fMRI inmediatamente después del ejercicio y 24 horas después no se ha investigado demasiado en relación a la memoria episódica y el aprendizaje (Slutsky-Ganesh, Etnier y Labban, 2020).

1.2.2. Hiit y entrenamiento por circuito

Los métodos de entrenamiento por intervalos ya se estudian desde hace décadas en cualquier facultad de Ciencias de la Actividad Física, sin embargo, no fue hasta hace aproximadamente diez años cuando el HIIT ganó realmente popularidad. En ese momento, los fisiólogos del ejercicio empezaron a publicar una investigación tras otra que demostraba que los intervalos de alta intensidad podían producir un gran beneficio para la salud en relación a la poca cantidad de tiempo invertido en el ejercicio. El New York Times fue el primer medio popular en hablar sobre ello, con el entrenamiento de siete minutos, el método de Jonhson&Jonhson.

De pronto, en 2016, en el estudio más importante a nivel mundial sobre tendencias del ejercicio, el American College of Sports Medicine situaba el HIIT como una de las principales tendencias de fitness para 2020. En los programas de HIIT se suelen intercalar ráfagas cortas de ejercicio intenso con descanso o ejercicios de menor intensidad. Estos entrenamientos suelen combinar el entrenamiento de fuerza (ya sea con autocarga o sobrecargas externas) con ejercicio aeróbico como descanso activo.

Tenemos que tener claro que cuando hablamos de HIIT, nos referimos a ejercicios que alternan tiempos de descanso activos menos extenuante con fases de trabajo de carga intensa, en las que la frecuencia cardíaca debe superar el 85% de su frecuencia máxima. Además deberá completar fases de uno a cinco minutos.

Las investigaciones recientes también se han dedicado a los posibles impactos del ejercicio con sobrecargas a la luz de los resultados favorables observados. A diferencia del entrenamiento de resistencia, que suele implicar la realización de un mismo patrón de movimiento de forma repetida (como correr o montar en bicicleta), el entrenamiento con sobrecargas suele implicar una variedad de ejercicios variados tanto para las extremidades superiores como para las inferiores. Por lo tanto, es posible hipotetizar que el entrenamiento de fuerza, dada su mayor variabilidad, puede excitar el cerebro al menos en la misma medida que el ejercicio aeróbico (Wilke, 2019). Se ha comprobado que los efectos del entrenamiento con sobrecargas sobre diversas medidas de la cognición son variables, pero principalmente menores y beneficiosos (van Uffelen, 2008; Snowden, 2011; Loprinzi, 2018; Sáez de Asteasu, 2017). Sus resultados concuerdan con la información de dos meta-análisis de ensayos que



inscribieron a personas mayores sanas para regímenes de entrenamiento a largo plazo. La memoria de trabajo o la atención no se vieron afectadas por el ejercicio con sobrecargas, según Kelly et al. (2014), pero el razonamiento mejoró significativamente. Sólo encontraron un máximo de tres investigaciones por dominio cognitivo, por lo que su muestra era bastante limitada. Los resultados de 13 ensayos fueron combinados por Northey et al. (2018), quienes encontraron que el entrenamiento con sobrecargas tenía impactos moderados en la memoria de trabajo, la memoria y la función ejecutiva (DME: 0,49, 0,54 y 0,54, respectivamente).

Las pruebas relativas a los impactos inmediatos de una sesión de entrenamiento son escasas, en contraste con los datos accesibles para los programas crónicos. La revisión de Wilke et al. (2019) muestra que el rendimiento puede mejorar moderadamente tras una sola sesión de entrenamiento. En general, se encontraron tamaños del efecto (ES) más pequeños en meta-análisis anteriores (Chang, 2012; van Uffelen, 2008; Loprinzi, 2018; Sáez de Asteasu, 2017) que analizaban las consecuencias a largo plazo tras los tratamientos crónicos de entrenamiento con sobrecargas. Esta variación puede explicarse por los numerosos métodos por los que el ejercicio puede alterar la función cognitiva. Los estudios han demostrado que el entrenamiento aeróbico agudo mejora el flujo sanguíneo cerebral (Querido, 2007; Ogoh, 2009), y tras el entrenamiento con sobrecargas puede producirse un resultado comparable. Sin embargo, mientras que la demanda neuronal, el gasto cardíaco y la presión parcial de dióxido de carbono arterial son los factores clave que influyen en la perfusión cerebral tras el entrenamiento aeróbico, se ha planteado la hipótesis de que el entrenamiento con sobrecargas puede producir realmente fluctuaciones del flujo sanguíneo a través de las oscilaciones y/o los picos de la presión arterial (Ogoh, 2009). Otro posible factor tiene que ver con las variaciones en los niveles de cortisol sérico. Después de el entrenamiento con sobrecargas, Tsai et al. (2014) descubrieron que esta hormona del estrés estaba presente en mayores cantidades. Es interesante que estos aumentos estuvieran relacionados con el aumento del arousal, un estado psicofisiológico de alerta y vigilancia que puede afectar a la actividad cerebral.

Las alteraciones del rendimiento cognitivo inducidas por el ejercicio agudo parecen estar moderadas por procesos circulatorios (flujo sanguíneo y hormonas), pero las modificaciones estructurales pueden explicar mejor la respuesta a largo plazo. Estudios recientes apoyan la teoría de que el entrenamiento con sobrecargas crónica inicia la neurogénesis adulta. Por ejemplo, cuando Yarrow et al. (2010) investigaron la relación entre el entrenamiento con sobrecargas y la expresión del factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF), descubrieron un aumento de los niveles séricos de esta sustancia química justo después del entrenamiento. Las elevaciones de BDNF inducidas por el ejercicio también fueron más pronunciadas tras un periodo de intervención de 5 semanas, lo que apunta a la importancia de los estímulos repetidos. Otra investigación realizada por Tsai et al. (2015), tras una intervención de 12 meses de entrenamiento con sobrecargas, se observaron mayores niveles séricos del factor de crecimiento insulínico 1 (IGF-1), que está relacionado con la neurogénesis y la sinaptogénesis (Nieto-Estévez, 2016).



Wilke et al. (2019) no encontraron ninguna distinción entre entrenamiento con sobrecargas y entrenamiento aeróbico en términos de efectos agudos sobre la función cerebral. Este resultado es coherente con el análisis de Northey et al. (2018), que analizó cómo el ejercicio prolongado afectaba a la cognición en personas de 50 años o más. Sin embargo, los hallazgos del grupo de Wilke de que el entrenamiento con sobrecargas y el entrenamiento aeróbico son igual de eficaces en un contexto agudo debe leerse con cuidado. Dado que el límite inferior del intervalo de confianza para la comparación (0,01 a 0,20, DMS de 0,10 a favor de la entrenamiento aeróbico) es tan cercano a cero, que es posible que la adición de un solo estudio más a favor de el entrenamiento aeróbico hubiera sido suficiente para cambiar los resultados del meta-análisis. Para determinar si el entrenamiento aeróbico podría ser más eficaz es necesario realizar más investigaciones.

En diferentes circunstancias se pueden encontrar ventajas en los aumentos agudos de la función cognitiva. Dado que los atletas deben integrar e interpretar rápidamente una gran variedad de información sensorial a nivel supraespinal mientras forman y cambian programas motores bajo estrictas limitaciones de tiempo, y estas situaciones los ejercicios con sobrecargas durante el calentamiento podrían desempeñar un papel importante en la prevención de lesiones deportivas. Los dominios cognitivos como la flexibilidad cognitiva y el control inhibitorio, representan elementos importantes en este marco (Grooms, Appelbaum y Onate, 2015). Además, el estudio de Wilkerson et al. (2012) descubrió que el tiempo de reacción neurocognitivo podría utilizarse para predecir las lesiones de las extremidades inferiores, a pesar de la falta de pruebas de ensayos prospectivos. La capacidad de los deportistas para tomar decisiones durante los partidos podría verse favorecida por las mejoras cognitivas provocadas por las entrenamiento con sobrecargas, que también podrían ayudar a reducir las lesiones músculo esqueléticas y a aumentar el rendimiento deportivo. Huijgen et al. (2015) demostraron en un estudio transversal que los jugadores de fútbol juvenil de élite tienen un mejor control inhibitorio y flexibilidad cognitiva que los jugadores de sub-élite.

Las sesiones agudas de entrenamiento con sobrecargas pueden ser beneficiosas fuera del entorno deportivo en entornos profesionales o académicos, ya que las pausas activas, es decir, durante la hora de la comida, pueden potenciar las capacidades relacionadas con el trabajo y el estudio, como la flexibilidad cognitiva y la memoria de trabajo.

A pesar de los intrigantes ámbitos de aplicación, hay una serie de cuestiones que merecen un estudio adicional. La mayoría de los estudios abarcaron el impacto de las entrenamiento con sobrecargas en varias facetas de la función ejecutiva. Pero sería interesante explicar cómo afecta a otras áreas, como la memoria episódica. Además, aunque la evidencia científica nos proporciona un fuerte apoyo a la existencia de mejoras agudas en el rendimiento cognitivo inducidas por el entrenamiento con sobrecargas, no se sabe nada sobre los efectos a largo plazo. Por ejemplo, Pontifex et al. (2009) no descubrieron mejoras en el rendimiento cognitivo a los 30 minutos después del entrenamiento con sobrecargas.



El estudio de Johnson y cols. (2016) observó aumentos persistentes, pero no significativos, en algunos resultados a los 30 y 60 min. Aunque posiblemente estos aumentos se atribuyan a la excesiva variabilidad de los datos.

En conclusión, los parámetros de entrenamiento ideales (intensidad, duración, repeticiones) y las condiciones (edad, sexo) son todavía inciertos y deben ser aclarados, en contraste con los amplios efectos de el entrenamiento con sobrecargas sobre el rendimiento cognitivo y los subdominios relacionados.



CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA

2.1. Diseño del estudio y participantes

Experimental con dos variables, tipo de ejercicio realizado (HIFT o MICT), y rendimiento cognitivo. Ensayo clínico aleatorio a ciegas con un grupo control (CTRL), un grupo experimental con entrenamiento funcional de alta intensidad (HIFT) y un grupo con entrenamiento continuo de intensidad moderada (MICT) en el que se utilizará un diseño pre-intervención-postest. La población objetivo son los jóvenes de entre 18 y 25 años. Los criterios de inclusión para la participación en el estudio fueron que los participantes tuvieran una edad dentro del rango objetivo y que los participantes no tuvieran ninguna patología que pudiera influir en la práctica de ejercicio físico o actividad física. El reclutamiento de la muestra se llevó a cabo mediante el contacto directo con estudiantes universitarios en diversos centros de enseñanza superior.

2.2. Cálculo del tamaño muestral

El tamaño de la muestra se determinó con el programa informático G*Power (versión 3.1.9.7). Se realizó un análisis a priori para un modelo ANOVA de 3 [grupos] x 2 [tiempo] para el efecto principal del tiempo (es decir, pre, post) y el tipo de intervención (es decir, HIFT vs. MICT vs. CTRL) con un nivel alfa de 0,05 y una potencia de 0,80. Estimando un efecto global de la intervención de $F = 0,35$ y una correlación entre medidas repetidas de 0,90, serían necesarios un total de 67 sujetos en total (es decir, 22-23 sujetos por grupo). Teniendo en cuenta lo anterior y considerando una posible mortalidad experimental del 15%, deberían incluirse en el estudio al menos 77 sujetos (es decir, 25-26 por grupo) para encontrar diferencias significativas en las principales variables de interés de este estudio. Se reclutaron un total de 69 participantes que se dividieron entre los diferentes grupos.

Criterios de inclusión: Para participar en el estudio se requerirá que los participantes que tengan una edad en el intervalo objetivo.

Criterios de exclusión: Se excluirán a todos los participantes con patologías que puedan alterar la práctica de ejercicio físico o realización de actividad física.



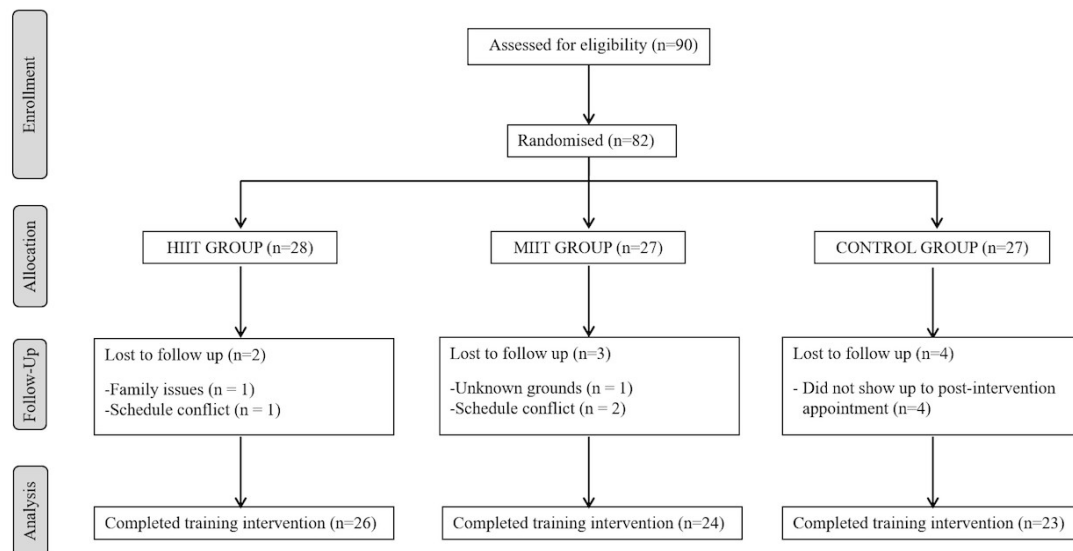


Figura 1. Diagrama de flujo del estudio

2.3. Asignación a la intervención

Se definieron tres grupos en el estudio. Un grupo de control (CTRL) de 14 participantes, un grupo experimental con entrenamiento funcional de intervalos de alta intensidad (HIFT) de 27 participantes, y otro grupo experimental con entrenamiento continuo de intensidad moderada (MICT) de 28 participantes. La asignación a los grupos fue una aleatorización simple y oculta. Los responsables del ingreso de los pacientes en la fase de intervención no sabían a qué grupo habían sido asignados. Esta asignación fue realizada previamente por un investigador que no intervino en las fases posteriores de evaluación, intervención, registro de datos y preparación de la base de datos. Todas las mediciones descritas anteriormente se realizaron en el grupo de control, en el grupo de alta intensidad y en el grupo de entrenamiento continuo justo antes del inicio de la intervención, e inmediatamente después se registraron los resultados en un registro de datos. El estudio se realizó de acuerdo con la Declaración de Helsinki, y fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad EADE (005/PE/TS/2022) el 10 de marzo de 2022 (figura 2).

2.4. Procedimiento

El grupo de control no fue sometido a ningún protocolo de entrenamiento, pero fue evaluado en la fase previa y posterior al estudio. Tras una evaluación inicial, el grupo HIFT fue sometido a una sesión de entrenamiento físico basada en un circuito de 6 ejercicios (Squat, Push-Up, Lunge, Push-Press, Box Jump, Planks) durante 30 minutos, realizando 10 repeticiones de cada ejercicio de forma continua, y descansando 2 minutos cada vez que completaban una ronda de los 6 ejercicios. Una vez finalizada la intervención, se les volvió a evaluar para ver si



había diferencias o no con los resultados obtenidos en la evaluación inicial. Durante el entrenamiento, se controló la frecuencia cardíaca de todos los participantes para mantenerla por encima del 85% de la frecuencia cardíaca (FC) máxima. Por último, un grupo de entrenamiento continuo de intensidad moderada (MICT), que tras una evaluación inicial fue sometido a una sesión de entrenamiento físico en cicloergómetro durante 30 minutos en la que la frecuencia cardíaca se mantuvo entre el 70% y el 80% de la frecuencia cardíaca máxima (FC). Una vez finalizada la intervención, se les volvió a someter a una evaluación final.



ETHICS COMMITTEE CERTIFICATE OF APPROVAL

This is to certify that

Project No: 005/PE/TS/2022

Project Title: *Acute effects of high-intensity functional training and moderate-intensity continuous training on cognitive functions.*

Principal Researcher: Manuel de Diego Moreno.

Date of approval: 10th March of 2022

Participant Information and Consent Form: 20th March of 2022

*was considered by the Ethics Committee on 10th March of 2022, meets the requirements of the Declaration of Helsinki (WMA) and was **APPROVED**.*

It is the Principal Researcher's responsibility to ensure that all researchers associated with this project are aware of the conditions of approval and which documents have been approved.

The Principal Researcher is required to notify the Secretary of the Ethics Committee, via amendment or progress report, of:

- Any significant change to the project and the reason for that change, including an indication of ethical implications (if any);
- Serious adverse effects on participants and the action taken to address those effects;
- Any other unforeseen events or unexpected developments that merit notification;
- The inability of the Principal Researcher to continue in that role, or any other change in research personnel involved in the project;
- Any expiry of the insurance coverage provided with respect to sponsored clinical trials and proof of re-insurance;
- A delay of more than 12 months in the commencement of the project; and,
- Termination or closure of the project.

Additionally, the Principal Researcher is required to submit

- A Progress Report on the anniversary of approval and on completion of the project;

The Ethics Committee may conduct an audit at any time.

The EADE University Ethics Committee is a properly constituted Human Research Ethics Committee in accordance with Declaration of Helsinki (WMA).

ARRABAL
SANCHEZ GABRIEL
- 24898901K

Firmado digitalmente
por ARRABAL SANCHEZ
GABRIEL - 24898901K
Fecha: 2022.07.28
11:42:19 +02'00'

SIGNED: D. Gabriel Arrabal
Academic Director

Figura 2. Certificado del Comité de Ética



2.5. Instrumentos

Se les evaluaron diferentes funciones cognitivas a través de tres tests:

a) Aprendizaje verbal y memoria declarativa retardada: con Word Recall Test, una prueba que consiste en una serie de ensayos de memoria con una lista de 10 palabras. Se muestra al individuo las palabras de la lista y se le pide que las recuerde después de realizar otra tarea no relacionada o después de un retraso. Normalmente, la puntuación se calcula registrando el número de palabras recordadas en cada uno de los cuatro ensayos (Goldstein, 2014).

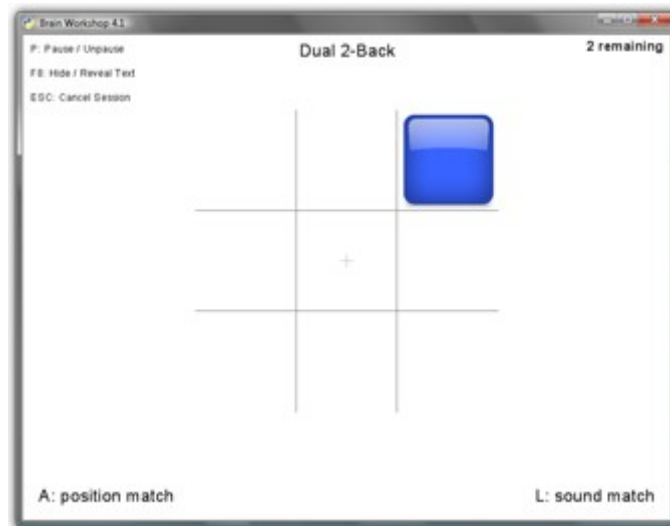
PASTEL	PLANETA	SOPA	
AZUL	POLICIA	PERFUME	
CONEJO	MESA	SILENCIO	GITARRA
LITERA	COLOR	CAFÉ	LUNA
PASTEL	AGUA	PATO	CESTA
	MADRE		

b) Función ejecutiva y atención selectiva: con la prueba de Stroop, en la cual se presenta una lista de palabras con colores que coinciden con la palabra (congruente, por ejemplo, la palabra 'rojo' presentada en rojo) o con colores que no coinciden con la palabra (incongruente, por ejemplo, la palabra 'rojo' presentada en azul) (Stroop, 1992; Sibley, Etnier y Le Masurier, 2006).



c) Memoria de trabajo: mediante la prueba N-back, donde se presenta una malla cuadrada de 3x3 en una en una pantalla. Los cuadrantes se van iluminando de uno en uno en orden aleatorio y los participantes deben identificar si cada cuadro mostrado es igual o diferente a la presentado n veces anteriormente (Crawford y Parker, 1992).





2.6. Análisis de los datos

Una vez recogidos los datos, se analizaron con el software SPSS v.25. Se realizó un estudio descriptivo de las variables de categorización (tabla 1). Posteriormente, se realizó una comparación de medias repetidas con ANOVA, donde no se encontraron diferencias significativas entre los grupos en ninguna de las variables, sin embargo, al comparar los grupos consigo mismos entre el pre-test y el post-test con la prueba t de Student para muestras relacionadas.



CAPÍTULO 3: RESULTADOS

Se evidenciaron cambios muy significativos ($p < 0,01$) en el tiempo de la respuesta más rápida (HIFT MD= -1. 14, $p < 0,01$, $d = 0,9$; MICT MD = -1,79, $p < 0,01$, $d = 0,9$) y en el tiempo medio de respuesta (HIFT MD = - 2,16, $p < 0,01$, $d = 0,66$; MICT MD = - 3. 07, $p < 0,01$, $d = 0. 9$) en el Test de Stroop (función ejecutiva y atención selectiva) y cambios significativos en el número de respuestas correctas ($p < 0,05$), tanto en el HIFT (DM= 1,08, $p < 0,05$, $d = 0,5$) como en el MICT (DM= 1,54, $p < 0,05$, $d = 0,5$). En el grupo de control no hay tales cambios (tablas 2,3,4).

Tabla 1. Descriptivos de Edad, IMC y Grupo.

Grupo	N	Edad (m ± sd)	IMC (m ± sd)
HIFT	27	21.62 ± 3.83	22.58 ± 1.97
MICT	28	20.25 ± 1.23	22.94 ± 0.80
CTRL	14	21.35 ± 2.43	22.93 ± 1.06

Datos presentados como media ± desviación estadística (m ± sd)

Tabla 2. Grupo Control. Descriptivos del pre-test, post-test y diferencias .

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	Nº Corrects	8.71 ± 2.09	9.07 ± 3.42	0.36
	Fast Response (seg)	9.68 ± 2.42	8.76 ± 2.32	-0.92
	Medium Response (seg)	15.16 ± 3.77	13.47 ± 4.30	-1.69
Word Recall	% corrects	67.85 ± 12.51	67.14 ± 15.40	-0.71
N-Back	1-Back (% corrects)	91.9 ± 11.14	93.32 ± 8.67	1.42
	2-Back (% corrects)	80.47 ± 15.11	82.27 ± 16.40	1.8
	3-Back (% corrects)	76.17 ± 16.88	75.20 ± 15.58	-0.97

Datos presentados como media ± desviación estadística (m ± sd)

Tabla 3. Grupo MICT. Descriptivos del pre-test, post-test y diferencias.

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	Nº Corrects	8.42 ± 2.58	9.96 ± 2.83	1.54*
	Fast Response (seg)	9.62 ± 2.17	7.83 ± 1.76	-1.79*
	Medium Response (seg)	14.20 ± 3.08	11.13 ± 2.03	-3.07**
Word Recall	% corrects	67.14 ± 13.29	66.78 ± 13.34	-0.36
N-Back	1-Back (% corrects)	93.56 ± 10.65	93.08 ± 8.41	-0.48
	2-Back (% corrects)	82.64 ± 12.30	88.09 ± 9.47	5.45*
	3-Back (% corrects)	72.17 ± 15.40	75.00 ± 14.47	2.83

Datos presentados como media ± desviación estadística (m ± sd)

- $p < 0.05$, ** $p < 0.01$



Tabla 4. Grupo HIFT. Descriptivos del pre-test, post-test y diferencias.

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	Nº Corrects	8.62 ± 2.35	9.70 ± 2.38	1.08*
	Fast Response (seg)	8.87 ± 1.70	7.73 ± 1.57	-1.14**
	Medium Response (seg)	14.02 ± 3.48	11.86 ± 2.77	-2.16**
Word Recall	% corrects	64.07 ± 13.08	68.51 ± 10.99	4.4
N-Back	1-Back (% corrects)	91.35 ± 11.37	90.87 ± 12.68	-0.48
	2-Back (% corrects)	77.80 ± 13.18	80.48 ± 14.89	2.68
	3-Back (% corrects)	72.10 ± 13.29	71.60 ± 13.78	-0.50

Datos presentados como media ± desviación estadística (m ± sd)
 p < 0.05, ** p < 0.01

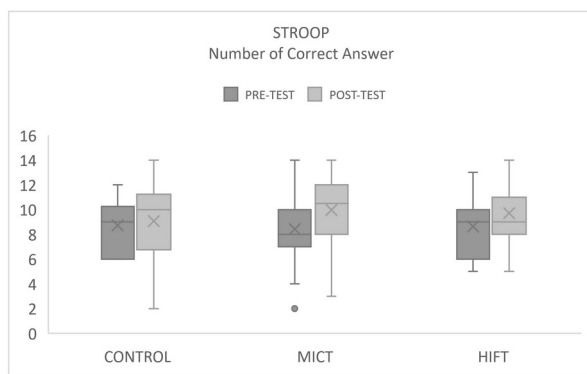


Figura 3. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en Stroop del Número de respuestas correctas de cada grupo .

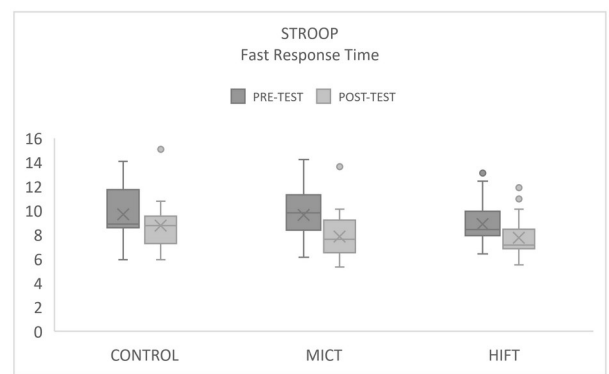


Figura 4. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en Stroop del Tiempo de respuesta en segundos más rápida de cada grupo.

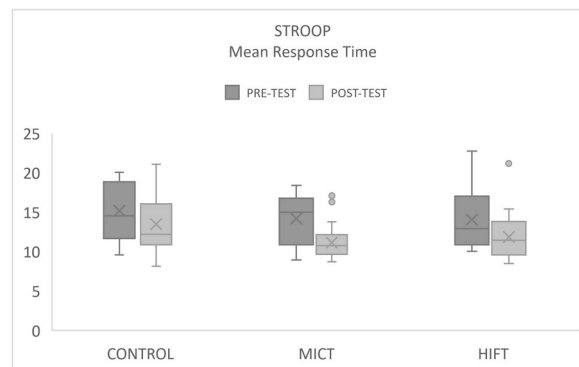


Figura 5. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en Stroop del Tiempo medio en segundos de respuesta de cada grupo.



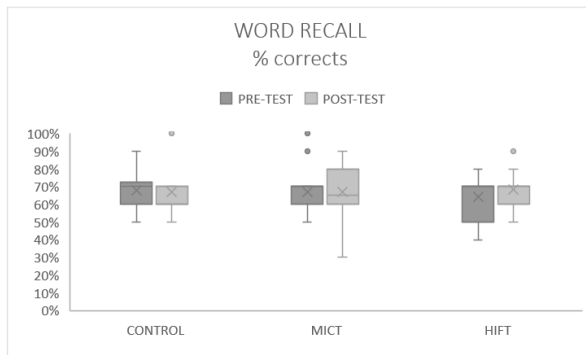


Figura 6. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en Word Recall de porcentaje de respuestas correctas de cada grupo.

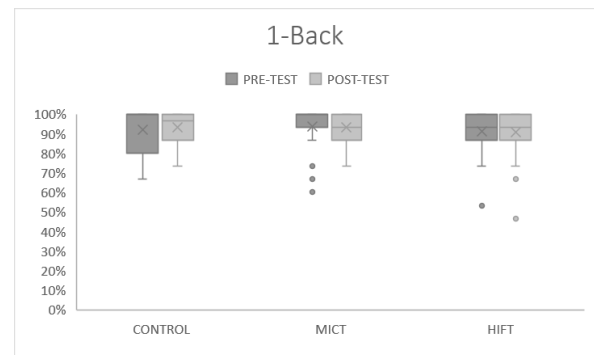


Figura 7. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en 1-Back de porcentaje de respuestas correctas de cada grupo.

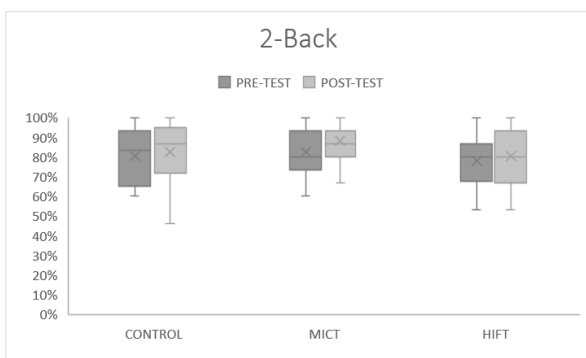


Figura 8. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en 2-Back de porcentaje de respuestas correctas de cada grupo.

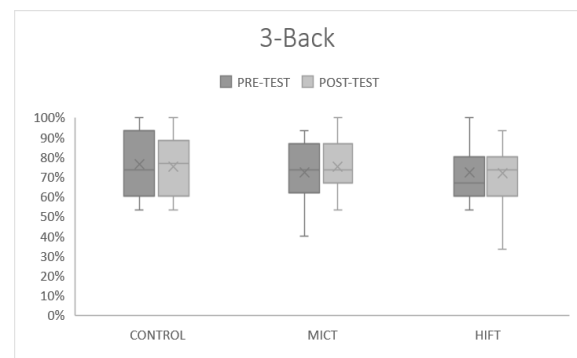


Figura 9. Esta figura muestra el boxplot del Pre y Post Test en 3-Back de porcentaje de respuestas correctas de cada grupo.



CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos concuerdan con la evidencia encontrada por otros autores. Por ejemplo, Kim et al. En 2015 encontraron un aumento no significativo de los factores neurotróficos (BDNF, NGF, IGF-1) en estudiantes universitarios tras un entrenamiento de taekwondo respecto al grupo control. Sin embargo, en los resultados de la prueba Stroop, si fueron significativamente diferentes ($p < 0.05$) en el grupo de ejercicio respecto al control. Estos hallazgos sugieren que el entrenamiento de ejercicios de Taekwondo (de naturaleza intensa) puede aumentar las funciones cognitivas, en concreto la atención selectiva y la función ejecutiva (Kim, 2015). Respecto a la memoria de trabajo, Van den Berg et al. evaluaron el rendimiento cognitivo, medido antes e inmediatamente después del ejercicio variando el tiempo de duración del mismo. Realizaron una prueba de atención y la tarea n-back para medir la atención selectiva y la memoria de trabajo, respectivamente. No hubo efectos significativos del ejercicio sobre la atención selectiva (es decir, la alerta, la orientación o el control ejecutivo) o el rendimiento de la memoria de trabajo inmediatamente después de las sesiones de ejercicio. Además, no hubo efectos diferenciales de la duración del ejercicio. En resumen, los ejercicios agudos con una duración de 10, 20 o 30 minutos no mejoraron, pero tampoco deterioraron el rendimiento cognitivo de los jóvenes adolescentes en comparación a un grupo de control sedentario (Van den Berg, 2018). Sobre la memoria declarativa el estudio de Kathryn en 2008, coincide también con nuestros resultados. Los investigadores evaluaron los efectos de una breve sesión de ejercicio moderado sobre la función ejecutiva, la memoria a corto plazo y las pruebas de memoria a largo plazo. Dieciocho adultos jóvenes (edad media de 22,2 años, $sd \pm 1,6$) realizaron una prueba de cambio de juego, una prueba de Brown-Peterson y una prueba de memoria de palabras (Word recall) antes y después de 40 minutos de ejercicio aeróbico moderado en una bicicleta ergométrica, y dos grupos de control. Tras el ejercicio no hallaron aumentos en el cambio de juego, ni en la memoria declarativa, lo que sugiere que la excitación inducida por el ejercicio no influye en los procesos de la función ejecutiva implicados en la reconfiguración de la información en la memoria de trabajo.

Se ha especulado que el entrenamiento crónico de alta intensidad desencadena la neurogénesis adulta, lo que se ve respaldado por datos recientes. Por ejemplo, cuando Yarrow et al. (2010) examinaron la asociación entre el entrenamiento de sobrecarga y la expresión del BDNF, detectaron niveles séricos elevados de esta sustancia inmediatamente después del entrenamiento. Además, tras 5 semanas de intervención, los aumentos de BDNF inducidos por el ejercicio fueron aún más pronunciados, lo que sugiere la importancia de este tipo de estímulos (Tsai et al., 2015), se midieron mayores niveles séricos del factor de crecimiento similar a la insulina-1 (IGF-1), que está relacionado con la neurogénesis y la sinaptogénesis (Nieto-Estévez, Defterali y Vicario-Abejón, 2016) tras una intervención de 12 meses de entrenamiento con sobrecarga. Por último, Best et al. (2015) demostraron que 52 semanas de entrenamiento de sobrecarga redujeron la atrofia de la sustancia blanca relacionada con la edad en mujeres mayores.



Son muchas las investigaciones que respaldan datos similares sobre que una sola sesión de ejercicio puede tener un moderado efecto beneficioso ($d = 0,097$) sobre el rendimiento cognitivo, como reza el meta-análisis de Chang et al. en 2012 en base a los resultados de 79 investigaciones que se compilaron.

También coincide con los hallazgos varias revisiones narrativas (Brisswalter et al., 2002; McMorris y Graydon, 2000; Tomporowski, 2003a y Tomporowski, 2003b), así como con el efecto positivo moderado observado por Etnier et al (1997).

El paradigma de ejercicio agudo fue el primer moderador que se analizó en esta investigación, con una evaluación cognitiva administrada antes del ejercicio, e inmediatamente después del ejercicio o tras un retraso después del ejercicio. Independientemente del momento en que se realice la tarea cognitiva, los resultados muestran que se producen pequeños impactos favorables en el rendimiento cognitivo.

Los resultados de Lambourne y Tomporowski (2010), son muestra de ello. Encontraron un ligero efecto negativo en las mediciones durante el ejercicio, que contrastan con un moderado efecto positivo en las mediciones tras el ejercicio en el rendimiento cognitivo. Aunque es probable que los criterios de inclusión empleados para los dos meta-análisis son probablemente la causa de la discrepancia. En particular, Lambourne y Tomporowski centraron su revisión en estudios ($n = 40$) que empleaban diseños de medidas repetidas dentro de los sujetos y poblaciones de adultos jóvenes sanos para examinar los efectos. Por lo tanto, los mayores impactos podrían haber sido influenciados por la inclusión de investigaciones que examinaron los efectos en personas jóvenes y mayores, cuándo la mayoría de la evidencia científica nos dice que las adaptaciones cognitivas son altamente dependientes de la edad, por lo que hacer comparaciones mezclando ambas muestras genera ciertas dudas metodológicas.

Esto se corrobora por el hecho de que los efectos para las muestras de estudiantes de secundaria ($d = 0,165$) y adultos mayores ($d = 0,181$) fueron mayores que el tamaño medio del efecto ($d = 0,097$) para todas las muestras. Alternativamente, esto podría deberse simplemente a la inclusión de aproximadamente el doble de investigaciones, lo que podría llevar a una conclusión más precisa. Las conclusiones de Lambourne y Tomporowski (2010) se ven respaldadas por los resultados de nuestro estudio, que demuestran que el ejercicio agudo tiene un impacto positivo en las tareas cognitivas realizadas después del ejercicio.

En general, los resultados de las investigaciones muestran un ligero efecto favorable sobre el rendimiento cognitivo, independientemente de si las pruebas cognitivas se realizaban durante la actividad, justo después del ejercicio o en algún momento después del mismo. La intensidad del ejercicio se examinó dentro de cada paradigma planteado de ejercicio agudo y los resultados ofrecen un apoyo indirecto a los probables mecanismos neurofisiológicos de acción, aunque como hemos disertado anteriormente, todo parece indicar que el BDNF y la IGF-1 tienen una relación importante en estos efectos (Yarrow, 2010; Tsai, 2015).



Sin embargo, la cantidad de tiempo entre el ejercicio y la prueba cognitiva, así como la intensidad del ejercicio, tienen un efecto de interacción en el alcance del beneficio tras el ejercicio cuando la evaluación del rendimiento cognitivo se realiza justo después del ejercicio. En particular, parece que el ejercicio más ligero (intensidad ligera o moderada, de carácter aeróbico) es mejor cuando se realiza la evaluación inmediatamente, pero después de un retraso de más de un minuto en la evaluación, el ejercicio ligero pierde sus efectos favorables y el ejercicio más intenso tiene su mayor impacto (Chang et al., 2012). Esto demuestra que la intensidad del ejercicio afecta a los mecanismos que sustentan las ventajas cognitivas y que los efectos se disipan con bastante rapidez tras el cese de la actividad.

Estos resultados pueden implicar que las reacciones fisiológicas al ejercicio, como la frecuencia cardíaca, el factor neurotrófico derivado del cerebro, las endorfinas, la serotonina y la dopamina, son indicadores de los efectos sobre la función cognitiva. En otras palabras, si hay un retraso entre la sesión de ejercicio y el rendimiento de la tarea cognitiva, puede ser necesario un ejercicio de mayor intensidad para maximizar los efectos, mientras que el ejercicio de menor intensidad puede dar lugar a un nivel adecuado solo inmediatamente después del ejercicio (Chang et al., 2012).

También es interesante analizar cómo la duración del ejercicio previo a la administración de la prueba cognitiva afectó a los resultados. Una breve sesión de ejercicio no tuvo ningún impacto en el rendimiento cognitivo si se evaluaba la tarea durante el ejercicio. Incluso, si el ejercicio duraba solo entre 11 y 20 minutos de ejercicio, el impacto era perjudicial sobre la función cognitiva. Los ejercicios que duraban más de 20 minutos eran los que mostraban los primeros indicios de impacto positivo sobre el rendimiento cognitivo (Briswalter et al., 2002).

Estos resultados coinciden ampliamente con los publicados por Lambourne y Tomporowski (2010), quienes encontraron que el rendimiento cognitivo tenía impactos negativos cuando se medía entre 0 y 20 minutos en una única sesión de ejercicio y solo aparecían beneficios favorables cuando se evaluaba tras más de 20 minutos de ejercicio. Por lo tanto, parecería evidente que el rendimiento cognitivo se vería mejorado si se realizaran las evaluaciones después de que el sujeto hubiera estado ejercitándose durante un período de tiempo de 20 minutos o incluso más largo. Una vez más, esto puede implicar que los mecanismos fisiológicos son importantes y que tardan algún tiempo en alcanzar los niveles máximos necesarios para mejorar la cognición. Así, las sesiones de ejercicio más cortas tuvieron una influencia negativa en el rendimiento cognitivo, mientras que las sesiones de ejercicio más largas tuvieron un impacto favorable cuando se analizaron los resultados de los estudios con un retraso después del ejercicio. Estos hallazgos coinciden con los obtenidos en esta investigación, ya que el impacto en la función cognitiva conseguido en la evaluación posterior al ejercicio, se da tras un entrenamiento de 30 minutos, superando los 20 minutos mínimos que Tomporowski y Lambourne determinaron.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que factores como el cansancio y la deshidratación pueden ser más significativos en protocolos que duren más de 20 minutos, por lo que es necesario realizar más estudios para examinar la

influencia de la fatiga sobre el rendimiento cognitivo (Cian et al., 2000, Cian et al., 2001 y Tomporowski, 2003b).

A nivel de tiempo de reacción, el hecho de que las medidas del tiempo de reacción no mostraran efectos significativos para las tareas cognitivas propuestas (N-Back) es otro hallazgo contrastado por varios autores. En la literatura sobre el ejercicio agudo y el rendimiento cognitivo, especialmente en las investigaciones destinadas a probar la hipótesis de la U invertida, el uso de medidas de tiempo de reacción se ha convertido en algo bastante común. Algunos estudios anteriores han encontrado, que generalmente, las mediciones del tiempo de reacción son susceptibles a los efectos del ejercicio agudo (Tomporowski, 2003b). Pero dado que el efecto promedio para las medidas del tiempo de reacción no fue sustancialmente diferente de cero, esto puede indicar que existe una relación entre la intensidad del ejercicio y el tiempo de reacción tal que el promedio de los efectos a través de los niveles de intensidad es cero. Alternativamente, puede significar que esta medida del rendimiento cognitivo en relación con el ejercicio agudo no es especialmente precisa o sensible al impacto de la intensidad del ejercicio o el tiempo de duración del ejercicio.

Las medidas de memoria, incluyendo el tiempo de respuesta, nunca produjeron resultados consistentes, lo que sugiere que este constructo puede no ser especialmente susceptible a los efectos del ejercicio agudo. Esta conclusión también debe modificarse, ya que es probable que varias formas de memoria se vean afectadas por el ejercicio de diferentes maneras. Tomporowski llegó a la conclusión de que mientras la memoria a corto plazo y la memoria de trabajo no se ven beneficiadas por el ejercicio agudo, la memoria a largo plazo sí. Esta conclusión particular, sin embargo, es compatible con nuestro descubrimiento de que no todos los componentes de la memoria son influenciados positivamente por el ejercicio agudo. Sin embargo, dado que ciertos estudios empíricos (Ferris et al., 2007 y Winter et al., 2007) han mostrado un impacto favorable del ejercicio agudo en la memoria, se requiere más investigación para entender mejor las condiciones necesarias para ver estos efectos.

También debemos tener en cuenta como limitante en nuestra investigación que debido a la capacidad metabólica finita y constante del cerebro, los recursos neuronales utilizados para el ejercicio entran en conflicto con los necesarios para el procesamiento cognitivo, y la evidencia científica sugieren que se suele observar un efecto negativo en el rendimiento cognitivo en las personas que están menos en forma, lo que sugiere que estos individuos utilizan más energía para el ejercicio y, como resultado, tienen menos recursos disponibles para la función cognitiva (Chang et al., 2012). Sin embargo, los participantes que están en buena forma física utilizan menos recursos a nivel cerebral durante el ejercicio, dejando más recursos neuronales disponibles para la función cognitiva. En nuestro caso, no hubo disgregación de los grupos por nivel de rendimiento físico, lo cual puede influir en que se atenuará el impacto de los ejercicios sobre la media estadística de las variables evaluadas.



Otra variable a tener en cuenta es que los estudios nos muestran una tendencia a que los efectos del ejercicio son mayores cuando las pruebas se realizaron por la mañana, en lugar de por la tarde o por la noche, aunque la mayoría de los estudios no especificaron la hora del día en la que se realizaron las pruebas. Los investigadores que buscan potenciar las capacidades cognitivas de las personas en el trabajo o en la escuela pueden encontrar que esto tiene connotaciones importantes. Parece ser que ciertos procesos fisiológicos que se ven afectados por los ritmos diurnos, de manera que las mañanas son más propensas a experimentar impactos que las tardes (Chang et al., 2012).

Por todo lo disertado en los párrafos anteriores, es factible suponer que la intensidad afecta a la función cognitiva en circunstancias específicas, como con muestras de un determinado nivel de fitness, al ejecutar una determinada actividad cognitiva, al ejercitarse durante una determinada cantidad de tiempo y dependiendo de la hora del día. Estos intrincados impactos deben ser evaluados empírica y metódicamente, probando varios niveles de intensidad dentro de un mismo estudio, segregando por niveles de condición física y realizando las evaluaciones a la misma hora del día.

También es razonable asumir que es probable que estos mecanismos fisiológicos sean de naturaleza transitoria y, por lo tanto, el tiempo de duración de esas mejoras del rendimiento cognitivo se vean afectados tanto por la intensidad del ejercicio, como por el momento en que se realiza, y por la aptitud física de los participantes.

Los puntos fuertes del presente estudio incluyen la evaluación del efecto agudo de un método de entrenamiento HIFT y MICT sobre las funciones cognitivas. Se trata de un nuevo enfoque que difiere sustancialmente de los empleados habitualmente en la literatura en relación con el ejercicio, que normalmente evalúan las respuestas cognitivas al entrenamiento prolongado. Hay que reconocer algunas limitaciones respecto a este estudio, los participantes son todos estudiantes universitarios de ciencias de la educación física, por lo que sus adaptaciones fisiológicas y funcionales al ejercicio están por encima de la media habitual de los estudiantes universitarios, lo que podría haber aumentado el efecto agudo del ejercicio sobre las respuestas cognitivas.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

En base a los resultado obtenidos en la investigación, podemos afirmar:

- El ejercicio agudo de alta intensidad y el de intensidad moderada tienen efectos significativos sobre la función ejecutiva y la atención selectiva en estudiantes universitarios jóvenes de 18 a 25 años.
- El ejercicio agudo de alta y de moderada intensidad tuvo leves o nulos efectos sobre la memoria declarativa y de trabajo en estudiantes universitarios jóvenes de 18 a 25 años.
- El ejercicio agudo mejoró la media del aprendizaje verbal y de la memoria declarativa retardada del grupo HIFT respecto al grupo de control y MICT, aunque no de manera significativa, en estudiantes universitarios jóvenes de 18 a 25 años .
- Un ejercicio agudo de alta y de moderada intensidad de solo 30 minutos provoca cambios significativos en funciones cognitivas como la función ejecutiva, atención selectiva y memoria de trabajo en estudiantes universitarios jóvenes de 18 a 25 años.

Conclusión general:

Los resultados de esta tesis doctoral demuestran que incluso con solo 30 minutos de ejercicio agudo, si la intensidad es alta, las funciones cognitivas se pueden ver mejoradas, siendo algunos de estos cambios muy significativos. Por ello, la inclusión de entrenamiento de estas características previo a tareas que tengan un alto requerimiento cognitivo, puede ser una estrategia a tener en cuenta de cara a potenciar el rendimiento de estas. Sería interesante investigar si estos efectos del ejercicio agudo de alta intensidad sobre las funciones cognitivas, puede también mejorar el desempeño táctico en deportes complejos, como los de cooperación-oposición.



REFERENCIAS

1. Adcock, R. A. et al. (2000) "Functional neuroanatomy of executive processes involved in dual-task performance", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(7), pp. 3567–3572. doi: 10.1073/pnas.97.7.3567.
2. Al-Aidroos, N., Said, C. P. y Turk-Browne, N. B. (2012) "Top-down attention switches coupling between low-level and high-level areas of human visual cortex", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(36), pp. 14675–14680. doi: 10.1073/pnas.1202095109.
3. Anders, J. P. V. et al. (2021) "Acute effects of high-intensity resistance exercise on cognitive function", *Journal of sports science & medicine*, 20(3), pp. 391–397. doi: 10.52082/jssm.2021.391.
4. Angevaren, M. et al. (2007) "Intensity, but not duration, of physical activities is related to cognitive function", *European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation: official journal of the European Society of Cardiology, Working Groups on Epidemiology & Prevention and Cardiac Rehabilitation and Exercise Physiology*, 14(6), pp. 825–830. doi: 10.1097/HJR.0b013e3282ef995b.
5. Audiffren, M., Tomporowski, P. D. y Zagrodnik, J. (2008) "Acute aerobic exercise and information processing: energizing motor processes during a choice reaction time task", *Acta psychologica*, 129(3), pp. 410–419. doi: 10.1016/j.actpsy.2008.09.006.
6. Audiffren, M., Tomporowski, P. D. y Zagrodnik, J. (2009) "Acute aerobic exercise and information processing: modulation of executive control in a Random Number Generation task", *Acta psychologica*, 132(1), pp. 85–95. doi: 10.1016/j.actpsy.2009.06.008.
7. Babcock, K., Harriet (1931) "An experiment in the measurement of mental deterioration", *The journal of nervous and mental disease*, 74(3), p. 375. doi: 10.1097/00005053-193109000-00024.
8. Baddeley, A. D. y Logie, R. H. (1999) "Working memory: The multiple-component model", en Miyake, A. y Shah, P. (eds.) *Models of Working Memory*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 28–61.
9. Ball, K. y Owsley, C. (1993) "The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function", *Journal of the American Optometric Association*, 64(1), pp. 71–79.
10. Baltes, P. B., Staudinger, U. M. y Lindenberger, U. (1999) "Lifespan psychology: theory and application to intellectual functioning", *Annual review of psychology*, 50(1), pp. 471–507. doi: 10.1146/annurev.psych.50.1.471.
11. Batty, G. D., Deary, I. J. y Gottfredson, L. S. (2007) "Premorbid (early life) IQ and later mortality risk: systematic review", *Annals of epidemiology*, 17(4), pp. 278–288. doi: 10.1016/j.annepidem.2006.07.010.



12. van den Berg, V. et al. (2018) "Exercise of varying durations: No acute effects on cognitive performance in adolescents", *Frontiers in neuroscience*, 12, p. 672. doi: 10.3389/fnins.2018.00672.
13. Bermejo, J. L. et al. (2019) "Effects of an incremental maximal endurance exercise stress-induced cortisol on cognitive performance", *Journal of human sport and exercise*, 14(3). doi: 10.14198/jhse.2019.143.13.
14. Best, J. R. (2010) "Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise", *Developmental review: DR*, 30(4), pp. 331-351. doi: 10.1016/j.dr.2010.08.001.
15. Best, J. R. et al. (2015) "Long-term effects of resistance exercise training on cognition and brain volume in older women: Results from a randomized controlled trial", *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, 21(10), pp. 745-756. doi: 10.1017/s1355617715000673.
16. Blair, C., Granger, D. y Peters Razza, R. (2005) "Cortisol reactivity is positively related to executive function in preschool children attending head start", *Child development*, 76(3), pp. 554-567. doi: 10.1111/j.1467-8624.2005.00863.x.
17. Blumenfeld, R. S. y Ranganath, C. (2007) "Prefrontal cortex and long-term memory encoding: an integrative review of findings from neuropsychology and neuroimaging", *The Neuroscientist: a review journal bringing neurobiology, neurology and psychiatry*, 13(3), pp. 280-291. doi: 10.1177/1073858407299290.
18. Brisswalter, J., Collardeau, M. y René, A. (2002) "Effects of acute physical exercise characteristics on cognitive performance", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 32(9), pp. 555-566. doi: 10.2165/00007256-200232090-00002.
19. Brown, D. R. y Blanton, C. J. (2002) "Physical activity, sports participation, and suicidal behavior among college students", *Medicine and science in sports and exercise*, 34(7), pp. 1087-1096. doi: 10.1097/00005768-200207000-00006.
20. Browne, S. E. et al. (2017) "Effects of acute high-intensity exercise on cognitive performance in trained individuals: A systematic review", *Progress in brain research*, 234, pp. 161-187. doi: 10.1016/bs.pbr.2017.06.003.
21. Cabeza, R. y Kingstone, A. (eds.) (2001) *Handbook of functional neuroimaging of cognition*. Londres, Inglaterra: MIT Press.
22. Carone, D. A. (2007) "E. Strauss, E. m. s. sherman, & O. spreen, A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary: A review of: '(3rd ed.), oxford university press, New York, 2006.'", *Applied neuropsychology*, 14(1), pp. 62-63. doi: 10.1080/09084280701280502.
23. Carroll, J. B. (1993) *Human cognitive abilities: A survey of factor-analytic studies*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press.
24. Chang, H. et al. (2017) "Effects of acute high-Intensity resistance exercise on cognitive function and oxygenation in prefrontal cortex", *Journal of*



- exercise nutrition & biochemistry, 21(2), pp. 1-8. doi: 10.20463/jenb.2017.0012.
25. Chang, Y. K. et al. (2012) "The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis", *Brain research*, 1453, pp. 87-101. doi: 10.1016/j.brainres.2012.02.068.
 26. Chang, Y.-K. et al. (2017) "Acute exercise has a general facilitative effect on cognitive function: A combined ERP temporal dynamics and BDNF study: Acute exercise, BDNF, ERPs, and cognition", *Psychophysiology*, 54(2), pp. 289-300. doi: 10.1111/psyp.12784.
 27. Chen, A.-G. et al. (2016) "Neural basis of working memory enhancement after acute aerobic exercise: fMRI study of preadolescent children", *Frontiers in psychology*, 7, p. 1804. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01804.
 28. Cian, C. et al. (2000) "Influences of variations in body hydration on cognitive function: Effect of hyperhydration, heat stress, and exercise-induced dehydration", *Journal of psychophysiology*, 14(1), pp. 29-36. doi: 10.1027/0269-8803.14.1.29.
 29. Cian, C. et al. (2001) "Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration", *International journal of psychophysiology: official journal of the International Organization of Psychophysiology*, 42(3), pp. 243-251. doi: 10.1016/s0167-8760(01)00142-8.
 30. Coetsee, C. y Terblanche, E. (2017) "Cerebral oxygenation during cortical activation: the differential influence of three exercise training modalities. A randomized controlled trial", *European journal of applied physiology*, 117(8), pp. 1617-1627. doi: 10.1007/s00421-017-3651-8.
 31. Colcombe, S. y Kramer, A. F. (2003) "Fitness effects on the cognitive function of older adults: a meta-analytic study: A meta-analytic study", *Psychological science*, 14(2), pp. 125-130. doi: 10.1111/1467-9280.t01-1-01430.
 32. Coles, K. y Tomporowski, P. D. (2008) "Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory", *Journal of sports sciences*, 26(3), pp. 333-344. doi: 10.1080/02640410701591417.
 33. Corwin JL, B. F. W. (1993) "Psychological examination of traumatic encephalopathy By A. Rey and The complex figure test by PA Osterrieth", *Clinical Neuropsychologist*, 12, pp. 47-56.
 34. Crawford, J. R. y Parker, D. (1992) *A handbook of neuropsychological assessment*. Editado por W. W. McKinlay. London: Psychology Press.
 35. Diamond, A. (2013) "Executive functions", *Annual review of psychology*, 64(1), pp. 135-168. doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750.
 36. Diamond, A. y Lee, K. (2011) "Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old", *Science (New York, N.Y.)*, 333(6045), pp. 959-964. doi: 10.1126/science.1204529.
 37. Dickerson, B. C. y Eichenbaum, H. (2010) "The episodic memory system: neurocircuitry and disorders", *Neuropsychopharmacology: official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 35(1), pp. 86-104. doi: 10.1038/npp.2009.126.



38. Dietrich, A. y Audiffren, M. (2011) "The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise", *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 35(6), pp. 1305-1325. doi: 10.1016/j.neubiorev.2011.02.001.
39. Engström, J. et al. (2017) "Effects of cognitive load on driving performance: The cognitive control hypothesis", *Human factors*, 59(5), pp. 734-764. doi: 10.1177/0018720817690639.
40. Esteban-Cornejo, I. et al. (2015) "Physical activity and cognition in adolescents: A systematic review", *Journal of science and medicine in sport*, 18(5), pp. 534-539. doi: 10.1016/j.jsams.2014.07.007.
41. Etnier, J. L. et al. (1997) "The influence of physical fitness and exercise upon cognitive functioning: A meta-analysis", *Journal of sport & exercise psychology*, 19(3), pp. 249-277. doi: 10.1123/jsep.19.3.249.
42. Fedewa, A. L. y Ahn, S. (2011) "The effects of physical activity and physical fitness on children's achievement and cognitive outcomes: a meta-analysis: A meta-analysis", *Research quarterly for exercise and sport*, 82(3), pp. 521-535. doi: 10.1080/02701367.2011.10599785.
43. Fernandes, J., Arida, R. M. y Gomez-Pinilla, F. (2017) "Physical exercise as an epigenetic modulator of brain plasticity and cognition", *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 80, pp. 443-456. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.06.012.
44. Ferris, L. T., Williams, J. S. y Shen, C.-L. (2007) "The effect of acute exercise on serum brain-derived neurotrophic factor levels and cognitive function", *Medicine and science in sports and exercise*, 39(4), pp. 728-734. doi: 10.1249/mss.0b013e31802f04c7.
45. Firth, J. et al. (2017) "Aerobic exercise improves cognitive functioning in people with schizophrenia: A systematic review and meta-analysis", *Schizophrenia bulletin*, 43(3), pp. 546-556. doi: 10.1093/schbul/sbw115.
46. Folstein, M. F., Folstein, S. E. y McHugh, P. R. (1975) "'Mini-mental state'. A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician", *Journal of psychiatric research*, 12(3), pp. 189-198. doi: 10.1016/0022-3956(75)90026-6.
47. Fragala, M. S. et al. (2011) "Neuroendocrine-immune interactions and responses to exercise", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 41(8), pp. 621-639. doi: 10.2165/11590430-000000000-00000.
48. Freitas, D. A. et al. (2018) "High intensity interval training modulates hippocampal oxidative stress, BDNF and inflammatory mediators in rats", *Physiology & behavior*, 184, pp. 6-11. doi: 10.1016/j.physbeh.2017.10.027.
49. French, D. N. et al. (2007) "Anticipatory responses of catecholamines on muscle force production", *Journal of applied physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 102(1), pp. 94-102. doi: 10.1152/jappphysiol.00586.2006.
50. García-Hermoso, A. et al. (2021) "Effects of physical education interventions on cognition and academic performance outcomes in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis", *British journal of sports medicine*, 55(21), pp. 1224-1232. doi: 10.1136/bjsports-2021-104112.



51. Gershon, P. et al. (2017) "Teens' distracted driving behavior: Prevalence and predictors", *Journal of safety research*, 63, pp. 157-161. doi: 10.1016/j.jsr.2017.10.002.
52. Gibala, M. J. et al. (2012) "Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease: Adaptations to low-volume, high-intensity interval training", *The journal of physiology*, 590(5), pp. 1077-1084. doi: 10.1113/jphysiol.2011.224725.
53. Gold, J. M. (1997) "Auditory working memory and Wisconsin card sorting test performance in schizophrenia", *Archives of general psychiatry*, 54(2), p. 159. doi: 10.1001/archpsyc.1997.01830140071013.
54. Goldstein, E. (2014) *Cognitive psychology: Connecting mind, research and everyday experience*. 4a ed. Belmont, CA, USA: Wadsworth Publishing.
55. Granholm, E., Asarnow, R. F. y Marder, S. R. (1996) "Dual-task performance operating characteristics, resource limitations, and automatic processing in schizophrenia", *Neuropsychology*, 10(1), pp. 11-21. doi: 10.1037/0894-4105.10.1.11.
56. de Greeff, J. W. et al. (2018) "Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: a meta-analysis", *Journal of science and medicine in sport*, 21(5), pp. 501-507. doi: 10.1016/j.jsams.2017.09.595.
57. Grooms, D., Appelbaum, G. y Onate, J. (2015) "Neuroplasticity following anterior cruciate ligament injury: a framework for visual-motor training approaches in rehabilitation", *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 45(5), pp. 381-393. doi: 10.2519/jospt.2015.5549.
58. Groot, C. et al. (2016) "The effect of physical activity on cognitive function in patients with dementia: A meta-analysis of randomized control trials", *Ageing research reviews*, 25, pp. 13-23. doi: 10.1016/j.arr.2015.11.005.
59. Gustafsson, G. et al. (2009) "The acute response of plasma brain-derived neurotrophic factor as a result of exercise in major depressive disorder", *Psychiatry research*, 169(3), pp. 244-248. doi: 10.1016/j.psychres.2008.06.030.
60. Haapala, E. (2012) "Physical activity, academic performance and cognition in children and adolescents. A systematic review", *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 4(1). doi: 10.2478/v10131-012-0007-y.
61. Harvey, P. D. et al. (2016) "Factor structure of cognition and functional capacity in two studies of schizophrenia and bipolar disorder: Implications for genomic studies", *Neuropsychology*, 30(1), pp. 28-39. doi: 10.1037/neu0000245.
62. Harvey, P. D. (2019) "Domains of cognition and their assessment", *Dialogues in clinical neuroscience*, 21(3), pp. 227-237. doi: 10.31887/DCNS.2019.21.3/pharvey.
63. Harvey, P. D. y Pedley, M. (1989) "Auditory and visual distractibility in schizophrenia. Clinical and medication status correlations", *Schizophrenia research*, 2(3), pp. 295-300. doi: 10.1016/0920-9964(89)90006-6.
64. Haverkamp, B. F. et al. (2020) "Effects of physical activity interventions on cognitive outcomes and academic performance in adolescents and



- young adults: A meta-analysis”, *Journal of sports sciences*, 38(23), pp. 2637–2660. doi: 10.1080/02640414.2020.1794763.
65. Heaney, J. L. J., Carroll, D. y Phillips, A. C. (2013) “DHEA, DHEA-S and cortisol responses to acute exercise in older adults in relation to exercise training status and sex”, *Age (Dordrecht, Netherlands)*, 35(2), pp. 395–405. doi: 10.1007/s11357-011-9345-y.
66. Helgerud, J. et al. (2007) “Aerobic high-intensity intervals improve VO₂max more than moderate training”, *Medicine and science in sports and exercise*, 39(4), pp. 665–671. doi: 10.1249/mss.0b013e3180304570.
67. Henckens, M. J. A. G. et al. (2012) “Time-dependent effects of cortisol on selective attention and emotional interference: a functional MRI study”, *Frontiers in integrative neuroscience*, 6, p. 66. doi: 10.3389/fnint.2012.00066.
68. Hillman, C. H., Erickson, K. I. y Kramer, A. F. (2008) “Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition”, *Nature reviews. Neuroscience*, 9(1), pp. 58–65. doi: 10.1038/nrn2298.
69. Hillman, C. H., Khan, N. A. y Kao, S.-C. (2015) “The relationship of health behaviors to childhood cognition and brain health”, *Annals of nutrition & metabolism*, 66 Suppl 3(Suppl. 3), pp. 1–4. doi: 10.1159/000381237.
70. Hindin, S. B. y Zelinski, E. M. (2012) “Extended practice and aerobic exercise interventions benefit untrained cognitive outcomes in older adults: a meta-analysis”, *Journal of the American Geriatrics Society*, 60(1), pp. 136–141. doi: 10.1111/j.1532-5415.2011.03761.x.
71. Howland JG, W. Y. T. (2008) “Stress effects in the hippocampus. Essence of memory”, en *Synaptic plasticity in learning and memory*. Elsevier, pp. 145–158.
72. Huijgen, B. C. H. et al. (2015) “Cognitive functions in elite and sub-elite youth soccer players aged 13 to 17 years”, *PloS one*, 10(12), p. e0144580. doi: 10.1371/journal.pone.0144580.
73. Izquierdo, M. et al. (2009) “Cytokine and hormone responses to resistance training”, *European journal of applied physiology*, 107(4), pp. 397–409. doi: 10.1007/s00421-009-1139-x.
74. Janssen, I. y Leblanc, A. G. (2010) “Systematic review of the health benefits of physical activity and fitness in school-aged children and youth”, *The international journal of behavioral nutrition and physical activity*, 7(1), p. 40. doi: 10.1186/1479-5868-7-40.
75. Jiménez-Maldonado, A. et al. (2018) “The impact of high-intensity interval training on brain derived neurotrophic factor in brain: A mini-review”, *Frontiers in neuroscience*, 12, p. 839. doi: 10.3389/fnins.2018.00839.
76. Johnson, L. et al. (2016) “An acute bout of exercise improves the cognitive performance of older adults”, *Journal of aging and physical activity*, 24(4), pp. 591–598. doi: 10.1123/japa.2015-0097.
77. Kandola, A. et al. (2016) “Aerobic exercise as a tool to improve hippocampal plasticity and function in humans: Practical implications for mental health treatment”, *Frontiers in human neuroscience*, 10, p. 373. doi: 10.3389/fnhum.2016.00373.



78. Kashiwara, K. et al. (2009) "Positive effects of acute and moderate physical exercise on cognitive function", *Journal of physiological anthropology*, 28(4), pp. 155-164. doi: 10.2114/jpa2.28.155.
79. Kelly, M. E. et al. (2014) "The impact of exercise on the cognitive functioning of healthy older adults: a systematic review and meta-analysis", *Ageing research reviews*, 16, pp. 12-31. doi: 10.1016/j.arr.2014.05.002.
80. Kessler, H. S., Sisson, S. B. y Short, K. R. (2012) "The potential for high-intensity interval training to reduce cardiometabolic disease risk", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 42(6), pp. 489-509. doi: 10.2165/11630910-000000000-00000.
81. Kim, Y. (2015) "The effect of regular Taekwondo exercise on Brain-derived neurotrophic factor and Stroop test in undergraduate student", *Journal of exercise nutrition & biochemistry*, 19(2), pp. 73-79. doi: 10.5717/jenb.2015.15060904.
82. Knaepen, K. et al. (2010) "Neuroplasticity - exercise-induced response of peripheral brain-derived neurotrophic factor: a systematic review of experimental studies in human subjects: A systematic review of experimental studies in human subjects", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 40(9), pp. 765-801. doi: 10.2165/11534530-000000000-00000.
83. Kraemer, W. J. y Ratamess, N. A. (2005) "Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 35(4), pp. 339-361. doi: 10.2165/00007256-200535040-00004.
84. Labban, J. D. y Etnier, J. L. (2018) "The effect of acute exercise on encoding and consolidation of long-term memory", *Journal of sport & exercise psychology*, 40(6), pp. 336-342. doi: 10.1123/jsep.2018-0072.
85. Lambourne, K. y Tomporowski, P. (2010) "The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis", *Brain research*, 1341, pp. 12-24. doi: 10.1016/j.brainres.2010.03.091.
86. Laske, C. et al. (2010) "Exercise-induced normalization of decreased BDNF serum concentration in elderly women with remitted major depression", *The international journal of neuropsychopharmacology*, 13(5), pp. 595-602. doi: 10.1017/S1461145709991234.
87. Lebel, C. et al. (2008) "Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood", *NeuroImage*, 40(3), pp. 1044-1055. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.12.053.
88. Lees, C. y Hopkins, J. (2013) "Effect of aerobic exercise on cognition, academic achievement, and psychosocial function in children: a systematic review of randomized control trials", *Preventing chronic disease*, 10(130010), p. E174. doi: 10.5888/pcd10.130010.
89. Lenroot, R. K. y Giedd, J. N. (2006) "Brain development in children and adolescents: insights from anatomical magnetic resonance imaging", *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 30(6), pp. 718-729. doi: 10.1016/j.neubiorev.2006.06.001.



90. Lepage, M. et al. (2000) "Prefrontal cortex and episodic memory retrieval mode", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(1), pp. 506-511. doi: 10.1073/pnas.97.1.506.
91. Li, J. y Siegrist, J. (2012) "Physical activity and risk of cardiovascular disease--a meta-analysis of prospective cohort studies", *International journal of environmental research and public health*, 9(2), pp. 391-407. doi: 10.3390/ijerph9020391.
92. Li, J. W. et al. (2017) "The effect of acute and chronic exercise on cognitive function and academic performance in adolescents: A systematic review", *Journal of science and medicine in sport*, 20(9), pp. 841-848. doi: 10.1016/j.jsams.2016.11.025.
93. Li, L. et al. (2014) "Acute aerobic exercise increases cortical activity during working memory: a functional MRI study in female college students", *PloS one*, 9(6), p. e99222. doi: 10.1371/journal.pone.0099222.
94. Liu, P. Z. y Nusslock, R. (2018) "Exercise-Mediated Neurogenesis in the Hippocampus via BDNF", *Frontiers in neuroscience*, 12. doi: 10.3389/fnins.2018.00052.
95. Löllgen, H., Böckenhoff, A. y Knapp, G. (2009) "Physical activity and all-cause mortality: an updated meta-analysis with different intensity categories", *International journal of sports medicine*, 30(3), pp. 213-224. doi: 10.1055/s-0028-1128150.
96. Lopez-Garcia, P. et al. (2016) "The neural circuitry supporting goal maintenance during cognitive control: a comparison of expectancy AX-CPT and dot probe expectancy paradigms", *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 16(1), pp. 164-175. doi: 10.3758/s13415-015-0384-1.
97. Loprinzi, P. D., Edwards, M. K. y Frith, E. (2017) "Potential avenues for exercise to activate episodic memory-related pathways: a narrative review", *The European journal of neuroscience*, 46(5), pp. 2067-2077. doi: 10.1111/ejn.13644.
98. Loprinzi, P. D., Frith, E. y Edwards, M. K. (2018) "Resistance exercise and episodic memory function: a systematic review", *Clinical physiology and functional imaging*, 38(6), pp. 923-929. doi: 10.1111/cpf.12507.
99. Lövdén, M. et al. (2020) "Education and cognitive functioning across the life span", *Psychological science in the public interest: a journal of the American Psychological Society*, 21(1), pp. 6-41. doi: 10.1177/1529100620920576.
100. Lu, B. y Gottschalk, W. (2000) "Modulation of hippocampal synaptic transmission and plasticity by neurotrophins", *Progress in brain research*, 128, pp. 231-241. doi: 10.1016/S0079-6123(00)28020-5.
101. Ludyga, S. et al. (2016) "Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis: Moderate exercise and executive function", *Psychophysiology*, 53(11), pp. 1611-1626. doi: 10.1111/psyp.12736.
102. Martínez-Díaz, I. C., Escobar-Muñoz, M. C. y Carrasco, L. (2020) "Acute effects of high-intensity interval training on Brain-Derived Neurotrophic Factor, cortisol and working memory in physical education college



- students”, *International journal of environmental research and public health*, 17(21), p. 8216. doi: 10.3390/ijerph17218216.
103. Martland, R. et al. (2020) “Can high-intensity interval training improve physical and mental health outcomes? A meta-review of 33 systematic reviews across the lifespan”, *Journal of sports sciences*, 38(4), pp. 430-469. doi: 10.1080/02640414.2019.1706829.
 104. McMorris, T. et al. (2011) “Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: a meta-analytical comparison of effects”, *Physiology & behavior*, 102(3-4), pp. 421-428. doi: 10.1016/j.physbeh.2010.12.007.
 105. Mekari, S. et al. (2015) “The relationship between exercise intensity, cerebral oxygenation and cognitive performance in young adults”, *European journal of applied physiology*, 115(10), pp. 2189-2197. doi: 10.1007/s00421-015-3199-4.
 106. Metcalfe, A. W. S. et al. (2016) “Effects of acute aerobic exercise on neural correlates of attention and inhibition in adolescents with bipolar disorder”, *Translational psychiatry*, 6(5), pp. e814-e814. doi: 10.1038/tp.2016.85.
 107. Moreau, D. y Chou, E. (2019) “The acute effect of high-intensity exercise on executive function: A meta-analysis”, *Perspectives on psychological science: a journal of the Association for Psychological Science*, 14(5), pp. 734-764. doi: 10.1177/1745691619850568.
 108. Nasreddine, Z. S. et al. (2005) “The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment: Moca: A brief screening tool for MCI”, *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(4), pp. 695-699. doi: 10.1111/j.1532-5415.2005.53221.x.
 109. Navon, D. (1977) “Forest before trees - Precedence of global features in visual-perception”, *Cognitive Psycho*, 9, pp. 353-383.
 110. Nieto-Estévez, V., Defterali, Ç. y Vicario-Abejón, C. (2016) “IGF-I: A key growth factor that regulates neurogenesis and synaptogenesis from embryonic to adult stages of the brain”, *Frontiers in neuroscience*, 10, p. 52. doi: 10.3389/fnins.2016.00052.
 111. Nofuji, Y. et al. (2008) “Decreased serum brain-derived neurotrophic factor in trained men”, *Neuroscience letters*, 437(1), pp. 29-32. doi: 10.1016/j.neulet.2008.03.057.
 112. Norman, D. A. y Bobrow, D. G. (1975) “On data-limited and resource-limited processes”, *Cognitive psychology*, 7(1), pp. 44-64. doi: 10.1016/0010-0285(75)90004-3.
 113. Northey, J. M. et al. (2018) “Exercise interventions for cognitive function in adults older than 50: a systematic review with meta-analysis”, *British journal of sports medicine*, 52(3), pp. 154-160. doi: 10.1136/bjsports-2016-096587.
 114. Ogoh, S. y Ainslie, P. N. (2009) “Regulatory mechanisms of cerebral blood flow during exercise: new concepts: New concepts”, *Exercise and sport sciences reviews*, 37(3), pp. 123-129. doi: 10.1097/JES.0b013e3181aa64d7.



115. Oltmanns, T. F. (1978) "Selective attention in schizophrenic and manic psychoses: the effect of distraction on information processing", *Journal of abnormal psychology*, 87(2), pp. 212-225. doi: 10.1037//0021-843x.87.2.212.
116. Piercy, K. L. et al. (2018) "The Physical Activity Guidelines for Americans", *JAMA: the journal of the American Medical Association*, 320(19), pp. 2020-2028. doi: 10.1001/jama.2018.14854.
117. Pontifex, M. B. et al. (2009) "The effect of acute aerobic and resistance exercise on working memory", *Medicine and science in sports and exercise*, 41(4), pp. 927-934. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181907d69.
118. Prince, M., Wimo, A., Guerchet, M., Ali, G.-C., Wu, Y.-T., & Prina, M. (2015) *World Alzheimer Report 2015—The global impact of dementia: An analysis of prevalence, incidence, cost and trends*.
119. Querido, J. S. y Sheel, A. W. (2007) "Regulation of cerebral blood flow during exercise", *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(9), pp. 765-782. doi: 10.2165/00007256-200737090-00002.
120. Quesada, A. A. et al. (2012) "Psychosocial stress exposure impairs memory retrieval in children", *Psychoneuroendocrinology*, 37(1), pp. 125-136. doi: 10.1016/j.psyneuen.2011.05.013.
121. Reitan, R. M. y Wolfson, D. (1985) *Neuroanatomy & Neuropathology: A Clinical Guide for Neuropsychologists*. Neuropsychology Press.
122. Rentería, I. et al. (2020) "Short-term high-Intensity interval training increases systemic brain-derived neurotrophic factor (BDNF) in healthy women", *European journal of sport science: EJSS: official journal of the European College of Sport Science*, 20(4), pp. 516-524. doi: 10.1080/17461391.2019.1650120.
123. Robinson, M. M., Lowe, V. J. y Nair, K. S. (2018) "Increased brain glucose uptake after 12 weeks of aerobic high-intensity interval training in young and older adults", *The journal of clinical endocrinology and metabolism*, 103(1), pp. 221-227. doi: 10.1210/jc.2017-01571.
124. Roenker, D. L. et al. (2003) "Speed-of-processing and driving simulator training result in improved driving performance", *Human factors*, 45(2), pp. 218-233. doi: 10.1518/hfes.45.2.218.27241.
125. Roig, M. et al. (2013) "The effects of cardiovascular exercise on human memory: a review with meta-analysis", *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 37(8), pp. 1645-1666. doi: 10.1016/j.neubiorev.2013.06.012.
126. Roig, M. et al. (2016) "Time-dependent effects of cardiovascular exercise on memory", *Exercise and sport sciences reviews*, 44(2), pp. 81-88. doi: 10.1249/JES.0000000000000078.
127. Rojas Vega, S. et al. (2006) "Acute BDNF and cortisol response to low intensity exercise and following ramp incremental exercise to exhaustion in humans", *Brain research*, 1121(1), pp. 59-65. doi: 10.1016/j.brainres.2006.08.105.
128. Ross, N., Yau, P. L. y Convit, A. (2015) "Obesity, fitness, and brain integrity in adolescence", *Appetite*, 93, pp. 44-50. doi: 10.1016/j.appet.2015.03.033.



129. Rozenek, R. et al. (2016) "Acute cardiopulmonary and metabolic responses to high-intensity interval training protocols using 60 s of work and 60 s recovery", *Journal of strength and conditioning research*, 30(11), pp. 3014–3023. doi: 10.1519/JSC.0000000000001414.
130. Sáez de Asteasu, M. L. et al. (2017) "Role of physical exercise on cognitive function in healthy older adults: A systematic review of randomized clinical trials", *Ageing research reviews*, 37, pp. 117–134. doi: 10.1016/j.arr.2017.05.007.
131. Salas, C. R., Minakata, K. y Kelemen, W. L. (2011) "Walking before study enhances free recall but not judgement-of-learning magnitude", *Journal of cognitive psychology* (Hove, England), 23(4), pp. 507–513. doi: 10.1080/20445911.2011.532207.
132. Salthouse, T. A. (2005) "Relations between cognitive abilities and measures of executive functioning", *Neuropsychology*, 19(4), pp. 532–545. doi: 10.1037/0894-4105.19.4.532.
133. Santos-Concejero, J. et al. (2017) "Brain oxygenation declines in elite Kenyan runners during a maximal interval training session", *European journal of applied physiology*, 117(5), pp. 1017–1024. doi: 10.1007/s00421-017-3590-4.
134. Schmolesky, M. T., Webb, D. L. y Hansen, R. A. (2013) "The effects of aerobic exercise intensity and duration on levels of brain-derived neurotrophic factor in healthy men", *Journal of sports science & medicine*, 12(3), pp. 502–511.
135. Shiffrin, R. M. y Schneider, W. (1984) "Automatic and controlled processing revisited", *Psychological review*, 91(2), pp. 269–276. doi: 10.1037//0033-295x.91.2.269.
136. Sibley, B. A. y Etnier, J. L. (2003) "The relationship between physical activity and cognition in children: A meta-analysis", *Pediatric exercise science*, 15(3), pp. 243–256. doi: 10.1123/pes.15.3.243.
137. Sibley, B. A., Etnier, J. L. y Le Masurier, G. C. (2006) "Effects of an acute bout of exercise on cognitive aspects of Stroop performance", *Journal of sport & exercise psychology*, 28(3), pp. 285–299. doi: 10.1123/jsep.28.3.285.
138. Smith, M. et al. (2016) "The effect of exercise intensity on cognitive performance during short duration treadmill running", *Journal of human kinetics*, 51(1), pp. 27–35. doi: 10.1515/hukin-2015-0167.
139. Smith, P. J. et al. (2010) "Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials", *Psychosomatic medicine*, 72(3), pp. 239–252. doi: 10.1097/PSY.0b013e3181d14633.
140. Sng, E., Frith, E. y Loprinzi, P. D. (2018) "Temporal effects of acute walking exercise on learning and memory function", *American journal of health promotion: AJHP*, 32(7), pp. 1518–1525. doi: 10.1177/0890117117749476.
141. Snowden, M. et al. (2011) "Effect of exercise on cognitive performance in community-dwelling older adults: review of intervention trials and recommendations for public health practice and research: Exercise for



- cognition in older adults”, *Journal of the American Geriatrics Society*, 59(4), pp. 704–716. doi: 10.1111/j.1532-5415.2011.03323.x.
142. So, J. H. et al. (2017) “Intense exercise promotes adult hippocampal neurogenesis but not spatial discrimination”, *Frontiers in cellular neuroscience*, 11, p. 13. doi: 10.3389/fncel.2017.00013.
143. Solomon, P. R. et al. (1998) “A 7 minute neurocognitive screening battery highly sensitive to Alzheimer’s disease”, *Archives of neurology*, 55(3), pp. 349–355. doi: 10.1001/archneur.55.3.349.
144. Song, D. et al. (2018) “The effectiveness of physical exercise on cognitive and psychological outcomes in individuals with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis”, *International journal of nursing studies*, 79, pp. 155–164. doi: 10.1016/j.ijnurstu.2018.01.002.
145. Spearman, C. (1904) “‘general intelligence,’ objectively determined and measured”, *The American journal of psychology*, 15(2), p. 201. doi: 10.2307/1412107.
146. Stanford, K. I. y Goodyear, L. J. (2014) “Exercise and type 2 diabetes: molecular mechanisms regulating glucose uptake in skeletal muscle”, *Advances in physiology education*, 38(4), pp. 308–314. doi: 10.1152/advan.00080.2014.
147. Strenze, T. (2007) “Intelligence and socioeconomic success: A meta-analytic review of longitudinal research”, *Intelligence*, 35(5), pp. 401–426. doi: 10.1016/j.intell.2006.09.004.
148. Stroop, J. R. (1992) “Studies of interference in serial verbal reactions”, *Journal of experimental psychology. General*, 121(1), pp. 15–23. doi: 10.1037//0096-3445.121.1.15.
149. Stubbs, B. et al. (2018) “EPA guidance on physical activity as a treatment for severe mental illness: a meta-review of the evidence and Position Statement from the European Psychiatric Association (EPA), supported by the International Organization of Physical Therapists in Mental Health (IOPTMH)”, *European psychiatry: the journal of the Association of European Psychiatrists*, 54, pp. 124–144. doi: 10.1016/j.eurpsy.2018.07.004.
150. Tamnes, C. K. et al. (2017) “Development of the cerebral cortex across adolescence: A multisample study of inter-related longitudinal changes in cortical volume, surface area, and thickness”, *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*, 37(12), pp. 3402–3412. doi: 10.1523/jneurosci.3302-16.2017.
151. Tang, S. W. et al. (2008) “Influence of exercise on serum brain-derived neurotrophic factor concentrations in healthy human subjects”, *Neuroscience letters*, 431(1), pp. 62–65. doi: 10.1016/j.neulet.2007.11.019.
152. Tanner, A. V., Nielsen, B. V. y Allgrove, J. (2014) “Salivary and plasma cortisol and testosterone responses to interval and tempo runs and a bodyweight-only circuit session in endurance-trained men”, *Journal of sports sciences*, 32(7), pp. 680–689. doi: 10.1080/02640414.2013.850594.
153. Thomas, A. G. et al. (2012) “The effects of aerobic activity on brain structure”, *Frontiers in psychology*, 3. doi: 10.3389/fpsyg.2012.00086.



154. Tiffin, J. y Asher, E. J. (1948) "The Purdue pegboard; norms and studies of reliability and validity", *The Journal of applied psychology*, 32(3), pp. 234–247. doi: 10.1037/h0061266.
155. Tomporowski, P. D. (2003a) "Cognitive and behavioral responses to acute exercise in youths: A review", *Pediatric exercise science*, 15(4), pp. 348–359. doi: 10.1123/pes.15.4.348.
156. Tomporowski, P. D. (2003b) "Effects of acute bouts of exercise on cognition", *Acta psychologica*, 112(3), pp. 297–324. doi: 10.1016/s0001-6918(02)00134-8.
157. Tsai, C.-L. et al. (2014) "Executive function and endocrinological responses to acute resistance exercise", *Frontiers in behavioral neuroscience*, 8, p. 262. doi: 10.3389/fnbeh.2014.00262.
158. Tsai, C.-L. et al. (2015) "The effects of long-term resistance exercise on the relationship between neurocognitive performance and GH, IGF-1, and homocysteine levels in the elderly", *Frontiers in behavioral neuroscience*, 9, p. 23. doi: 10.3389/fnbeh.2015.00023.
159. Tsukamoto, H. et al. (2016) "Greater impact of acute high-intensity interval exercise on post-exercise executive function compared to moderate-intensity continuous exercise", *Physiology & behavior*, 155, pp. 224–230. doi: 10.1016/j.physbeh.2015.12.021.
160. van Uffelen, J. G. Z. et al. (2008) "The effects of exercise on cognition in older adults with and without cognitive decline: a systematic review", *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 18(6), pp. 486–500. doi: 10.1097/JSM.0b013e3181845f0b.
161. Uncapher, M. R. y Wagner, A. D. (2009) "Posterior parietal cortex and episodic encoding: insights from fMRI subsequent memory effects and dual-attention theory", *Neurobiology of learning and memory*, 91(2), pp. 139–154. doi: 10.1016/j.nlm.2008.10.011.
162. Vaynman, S. y Gomez-Pinilla, F. (2005) "License to run: exercise impacts functional plasticity in the intact and injured central nervous system by using neurotrophins", *Neurorehabilitation and neural repair*, 19(4), pp. 283–295. doi: 10.1177/1545968305280753.
163. Verbickas, V. et al. (2017) "Effect of sprint cycling and stretch-shortening cycle exercises on the neuromuscular, immune and stress indicators in young men", *Journal of physiology and pharmacology: an official journal of the Polish Physiological Society*, 68(1), pp. 125–132.
164. Verburgh, L. et al. (2014) "Physical exercise and executive functions in preadolescent children, adolescents and young adults: a meta-analysis", *British journal of sports medicine*, 48(12), pp. 973–979. doi: 10.1136/bjsports-2012-091441.
165. Wang, C.-C. et al. (2013) "Executive function during acute exercise: the role of exercise intensity", *Journal of sport & exercise psychology*, 35(4), pp. 358–367. doi: 10.1123/jsep.35.4.358.
166. Weston, M. et al. (2014) "Effects of low-volume high-intensity interval training (HIT) on fitness in adults: a meta-analysis of controlled and non-



- controlled trials”, *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(7), pp. 1005–1017. doi: 10.1007/s40279-014-0180-z.
167. Whitford, T. J. et al. (2007) “Brain maturation in adolescence: concurrent changes in neuroanatomy and neurophysiology”, *Human brain mapping*, 28(3), pp. 228–237. doi: 10.1002/hbm.20273.
168. Wilke, J. et al. (2019) “Acute effects of resistance exercise on cognitive function in healthy adults: A systematic review with multilevel meta-analysis”, *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 49(6), pp. 905–916. doi: 10.1007/s40279-019-01085-x.
169. Wilkerson, G. B. (2012) “Neurocognitive reaction time predicts lower extremity sprains and strains”, *International journal of athletic therapy & training*, 17(6), pp. 4–9. doi: 10.1123/ijatt.17.6.4.
170. Winter, B. et al. (2007) “High impact running improves learning”, *Neurobiology of learning and memory*, 87(4), pp. 597–609. doi: 10.1016/j.nlm.2006.11.003.
171. Xue, Y., Yang, Y. y Huang, T. (2019) “Effects of chronic exercise interventions on executive function among children and adolescents: a systematic review with meta-analysis”, *British journal of sports medicine*, 53(22), pp. 1397–1404. doi: 10.1136/bjsports-2018-099825.
172. Yanagisawa, H. et al. (2010) “Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test”, *NeuroImage*, 50(4), pp. 1702–1710. doi: 10.1016/j.neuroimage.2009.12.023.
173. Yarrow, J. F. et al. (2010) “Training augments resistance exercise induced elevation of circulating brain derived neurotrophic factor (BDNF)”, *Neuroscience letters*, 479(2), pp. 161–165. doi: 10.1016/j.neulet.2010.05.058.
174. Yerkes, R. M. y Dodson, J. D. (1908) “The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation”, *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18(5), pp. 459–482. doi: 10.1002/cne.920180503.



ANEXOS

A.1. Artículo publicado en la International Journal of Environmental Research and Public Health. *Acute Effects of High Intensity Functional Training and Moderate Intensity Continuous Training on Cognitive Functions in Young Adults.*





Article

Acute Effects of High-Intensity Functional Training and Moderate-Intensity Continuous Training on Cognitive Functions in Young Adults

Manuel de Diego-Moreno ^{1,2}, Francisco Álvarez-Salvago ^{2,3,*}, Antonio Martínez-Amat ²,
Carmen Boquete-Pumar ^{1,2}, Antonio Orihuela-Espejo ^{1,2}, Agustín Aibar-Almazán ²,
and José Daniel Jiménez-García ²

¹ Department of Physical Education, University of Wales, Trinity, Saint David, 29018 Málaga, Spain

² Department of Health Sciences, Faculty of Health Sciences, University of Jaén, 23071 Jaén, Spain

³ Department of Physiotherapy, Faculty of Health Sciences, European University of Valencia, 46112 Valencia, Spain

* Correspondence: salvagofran@gmail.com



Citation: de Diego-Moreno, M.; Álvarez-Salvago, F.; Martínez-Amat, A.; Boquete-Pumar, C.; Orihuela-Espejo, A.; Aibar-Almazán, A.; Jiménez-García, J.D. Acute Effects of High-Intensity Functional Training and Moderate-Intensity Continuous Training on Cognitive Functions in Young Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2022**, *19*, 10608. <https://doi.org/10.3390/ijerph191710608>

Academic Editor: Paul B. Tchounwou

Received: 29 July 2022

Accepted: 22 August 2022

Published: 25 August 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Background: The purpose of the present study was to compare the influence of an acute bout of high-intensity functional training (HIFT) with an acute bout of moderate-intensity continuous training (MICT) on measures of cognitive function. Methods: Sixty-nine young adults (Mean \pm SD: age = 21.01 \pm 2.79 yrs; body mass = 69.65 \pm 6.62 kg; height = 1.74 \pm 0.05 m; Body Mass Index = 22.8 \pm 1.41) gave informed consent and were randomly divided into three groups. The HIFT group, with 27 participants, performed a high-intensity (>85% Max. HR) circuit of functional exercises for 30 min. The MICT group, with 28 participants, performed moderate-intensity (70–80% Max. HR) continuous training on a cyclo-ergometer. The control group did not perform any activity. The Stroop Test, Word Recall and N-Back Test were completed to assess during the familiarization period, immediately before and immediately after the training's bouts. Results: The repeated measures ANOVA did not show significant mean differences for any group. However, the T-Test for the paired samples demonstrated very significant differences in the Stroop Test, in terms of fastest response time (FRT; mean difference (MD) = -1.14 , $p < 0.01$, $d = 0.9$), mean response time (MRT; MD = -2.16 , $p < 0.01$, $d = 0.66$) and the number of correct answers (NCA; MD = 1.08 , $p < 0.05$, $d = 0.5$) in the HIFT group and in the MICT group (FRT; MD = -1.79 , $p < 0.01$, $d = 0.9$), (MRT; MD = -3.07 , $p < 0.01$, $d = 0.9$) (NCA; MD = 1.54 , $p < 0.05$, $d = 0.5$). Conclusions: There were no differences in the control group. HIFT and MICT may elicit specific influences on cognitive function, mainly in executive function and selective attention.

Keywords: high-intensity; cognitive function; moderate-intensity; acute effect

1. Introduction

Most research to date has used aerobic exercise, which is continuous moderate- or low-intensity exercise, to examine the effects of physical activity and exercise on brain function. Small-to-moderate gains were seen in areas such as processing speed, attention, executive function and memory in a number of meta-analyses involving both acute and chronic therapies [1–11].

According to the theory, exercise has an acute impact on cognitive function that follows an inverted U relationship, which is similar to the arousal theory first put forth by Yerkes and Dodson [12]. These researchers were the first to postulate that, as exercise intensity increases, cognitive function gets better until a critical intensity is reached, at which it would become impaired. While studies examining the influence of high-intensity or overloaded exercise report ambiguous results [13,14], demonstrating both positive [15–17] and negative [13,14] results on cognitive function, scientific evidence has shown that the acute effects of moderate-intensity aerobic exercise positively affect cognitive function [5,18].

1.1. High-Intensity Exercise

High-intensity exercise has been demonstrated to generate significant alterations in brain metabolism [13,19], resulting in higher levels of neurochemicals [16,19,20] that are hypothesized to negatively affect cognitive functioning. A decline in performance following high-intensity exercise has also been observed in other studies [14,21]. For instance, Mekari et al. (2015) [13] used a modified Stroop test to investigate information processing and executive function under low- (40 percent of peak power), moderate- (60 percent) and high-intensity conditions (85 percent). When comparing the high-intensity exercise group to the low-intensity group, they discovered a significant increase in reaction time (i.e., a slower response) and a significant decrease in accuracy. In contrast to cycling at 30 percent HRR, 50 percent HRR and at rest, Wang et al. (2013) [21] found substantial declines in executive function measures, as measured by the Wisconsin Card Sorting Test, during a cycling exercise at 80 percent HRR. In addition, Smith et al. (2016) [14] found that jogging on a treadmill at high effort (80% HRR) resulted in slower reaction times, mistake rates, omission rates and choice errors compared to running at moderate intensity (70%) and during resting settings. The lack of the high-intensity exercise characteristics looked at and the need for additional context to fully understand the consequences of the research on such exercise, however, make these studies stand out [5,22,23].

1.2. High-Intensity Exercise with Overloads

Extensive research has also been conducted on overload exercise. The study by Anders et al. (2021) [24] found that high-intensity overload exercise resulted in a very varied response pattern in cognitive processes, suggesting that there was a greater performance in cognitive domains related to fundamental computational skills than in cognitive domains related to memory and recall. This demonstrated response suppression suggests that high-intensity endurance exercise may induce distinctive differential responses in a number of cognitive domains. More and more data point to the possibility that exercise-induced alterations may be domain-specific [22,25–27].

For instance, Audiffren et al. (2008, 2009) [25,26] investigated the effects of cycloergometer exercise performed for 35 min at 90% of the ventilatory threshold and also showed significant improvements in reaction time throughout the exercise protocol [25]. Additionally, Chang et al. (2017) [13] used a Stroop test to measure executive function (response inhibition) and reported significant improvements in reaction time compared to the control group, but they did not observe any differences in reaction time for the incongruent task. In a fairly detailed meta-analysis on the short-term impact of exercise on cognitive performance, Wilke et al. [27] came to the conclusion that overload exercise appears to be a suitable strategy for the short-term improvement of cognitive function in healthy persons. The research shows that a single session of overload exercise produces moderate improvements in cognitive function compared to a control group that does not exercise, and the acute effects of resistance exercise are not superior to those following aerobic exercise.

1.3. Moderate/Low-Intensity Exercise

Acute aerobic exercise has been found to enhance blood flow in the brain at the level of moderate- or low-intensity exercise [28,29]. The neural demand, cardiac output and arterial carbon dioxide partial pressure are the primary regulators of cerebral perfusion following aerobic exercise, and it has been hypothesized that, during high-intensity overloaded exercise, variations in the blood flow occur through oscillations or spikes in arterial pressure [29]. Changes in the serum cortisol levels are a different potential contributor. After moderate-intensity overload exercise, higher levels of the stress hormone were detected in a study [16].

The subject of whether aerobic exercise might be slightly more effective than high-intensity training requires further investigation. Acute enhancements in cognitive performance may be beneficial in certain situations. Because athletes must integrate and process

a wealth of sensory data at the supraspinal level in the majority of potentially traumatic scenarios, generating and revising motor plans under strict time restrictions, it may be crucial in the prevention of sports injuries. The key components of this paradigm are the cognitive domains examined—particularly, inhibitory control and cognitive flexibility [30]. A study by Wilkerson (2012) [31] discovered that neurocognitive reaction time might be utilized to predict lower extremity injuries, even though data from prospective trials are still lacking. For instance, just 2 of the 12 papers that made up Wilke et al. (2015)'s [27] meta-analysis included a further follow-up measurement. Pontifex et al. (2009) [32] showed no improvements in cognitive performance at 30 min after overload training in the first of these studies. The second experiment, conducted by Johnson et al. (2016) [33], discovered consistent but non-significant increases in various outcomes at 30 and 60 min. This was attributed to the high level of data variability.

2. Materials and Methods

2.1. Study Design and Participants

The experiment involved two variables: type of exercise performed (HIFT or MICT) and cognitive performance. A randomized single-blind clinical trial was conducted with a control group (CTRL), an experimental group with high-intensity functional training (HIFT) and a group with moderate-intensity continuous training (MICT), in which a pre-intervention-posttest design will be used. The target population is young people between 18 and 25 years. The inclusion criteria for participation in the study were that the participants had an age within the target range and that the participants did not have any pathology that could influence the practice of physical exercise or physical activity. The recruitment of the sample was carried out by direct contact with university students in various higher education centers.

2.2. Sample Size Calculation

The sample size was determined with G*Power software (Version 3.1.9.7, Axel Buchner, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germany). A priori analysis for a 3 [groups] × 2 [time] ANOVA model was performed for the main effect of time (i.e., pre, post) and intervention type (i.e., HIFT vs. MICT vs. CTRL), with an alpha level of 0.05 and a power of 0.80. Estimating an overall intervention effect of $F = 0.35$ and a correlation between repeated measures of 0.90, a total of 67 subjects in all (i.e., 22–23 subjects per group) would be necessary. Taking into account the above and considering a possible experimental mortality of 15%, at least 77 subjects (i.e., 25–26 per group) should be included in the study to find significant differences in the main variables of interest of this study. A total of 69 participants were recruited and divided between the different groups.

2.3. Allocation to Intervention

Three groups were defined in the study. A control group (CTRL) of 14 participants, an experimental group with high-intensity interval functional training (HIFT) of 27 participants and another experimental group with moderate-intensity continuous training (MICT) of 28 participants. The assignment to the groups was simple and involved concealed randomization. Those responsible for admitting the patients to the intervention phase did not know to which group they had been assigned. This assignment was made beforehand by a researcher who did not intervene in the subsequent phases of evaluation, intervention, data recording and database preparation. All the measurements described above were performed on the control group, the high-intensity group and the continuous training group just before the start of the intervention, and immediately afterwards, the results were recorded in a data log. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee of EADE University (005/PE/TS/2022) on 10 March 2022.

2.4. Procedure

The control group was not subjected to any training protocol but was evaluated in the pre- and post-study phase. After an initial evaluation, the HIFT group was subjected to a physical training session based on a circuit of 6 exercises (Squat, Push-Up, Lunge, Push-Press, Box Jump, Planks) for 30 min, performing 10 repetitions of each exercise continuously and resting 2 min each time they completed a round of the 6 exercises. Once the intervention was finished, they were again evaluated to see if there were differences with the results obtained in the initial evaluation. During training, the heart rate of all participants was monitored to maintain it above 85% of the maximum heart rate (HR). Finally, the moderate-intensity continuous training group (MICT), after an initial evaluation, was subjected to a physical training session on a cycloergometer for 30 min in which the heart rate was maintained between 70% and 80% of the heart rate maximum (HRM). Once the intervention was over, they were again subjected to a final evaluation (Figure 1).

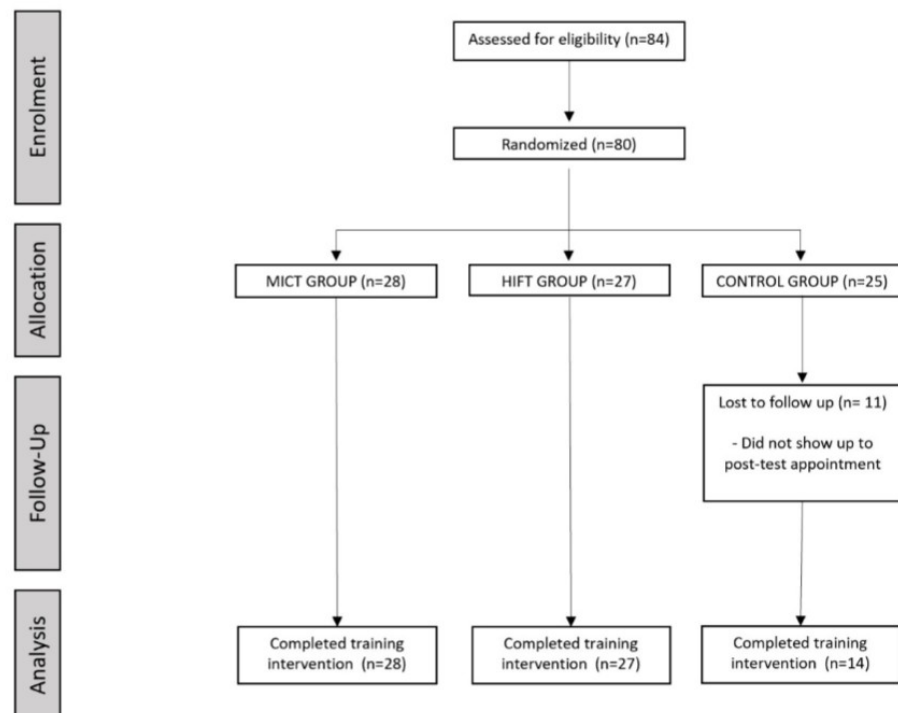


Figure 1. Flow Diagram of Study.

2.5. Instruments

They were assessed with the Word Recall Test (verbal learning, delayed declarative memory), which consists of a series of memory trials with a list of 10 words. The individual is shown the words on the list and is asked to recall them after performing another unrelated task or after a delay. The score is calculated by recording the number of words recalled in each of the four trials [34]. Stroop test (executive function, selective attention): a list of words is presented with colors that matched the word (congruent, e.g., the word 'red' presented in red) or with colors that did not match the word (incongruent, e.g., the word 'red' presented in blue) [35,36]. N-back Test (working memory): a string of letters is presented one at a time on a screen, and participants must identify whether each letter presented is the same as or different from the previously presented letter [37].

2.6. Data Analysis

Once the data were collected, they were analyzed with SPSS v.25 software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). A descriptive study of the categorization variables was carried out (Table 1). Subsequently, a repeated means comparison was performed with ANOVA, where no significant differences were found between the groups in any of the variables, however, when comparing the groups with themselves between the pre-test and post-tests with the Student's *t*-test for related samples.

Table 1. Descriptives of age and IMC by group.

Group	N	Age (m ± sd)	IMC (m ± sd)
HIFT	27	21.62 ± 3.83	22.58 ± 1.97
MICT	28	20.25 ± 1.23	22.94 ± 0.80
CTRL	14	21.35 ± 2.43	22.93 ± 1.06

Data submitted as means ± standard deviation (m ± sd).

3. Results

Very significant changes ($p < 0.01$) were evidenced in the time of the fastest response (HIFT MD = -1.14 , $p < 0.01$, $d = 0.9$; MICT MD = -1.79 , $p < 0.01$, $d = 0.9$) and in the mean response time (HIFT MD = -2.16 , $p < 0.01$, $d = 0.66$; MICT MD = -3.07 , $p < 0.01$, $d = 0.9$) in the Stroop Test (executive function and selective attention). Significant changes in the number of correct answers ($p < 0.05$) were evidenced for both the HIFT (MD = 1.08 , $p < 0.05$, $d = 0.5$) and MICT (MD = 1.54 , $p < 0.05$, $d = 0.5$) groups (Figure 2). In the control group, there were no such changes (Tables 2–4).

Table 2. Control Group. Descriptives of pre-test, post-test and differences.

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	N° Corrects	8.71 ± 2.09	9.07 ± 3.42	0.36
	Fast Response (s)	9.68 ± 2.42	8.76 ± 2.32	−0.92
	Medium Response (s)	15.16 ± 3.77	13.47 ± 4.30	−1.69
Word Recall	% corrects	67.85 ± 12.51	67.14 ± 15.40	−0.71
N-Back	1-Back (% corrects)	91.9 ± 11.14	93.32 ± 8.67	1.42
	2-Back (% corrects)	80.47 ± 15.11	82.27 ± 16.40	1.8
	3-Back (% corrects)	76.17 ± 16.88	75.20 ± 15.58	−0.97

Data submitted as means ± standard deviation (m ± sd).

Table 3. MICT Group. Descriptives of pre-test, post-test and differences.

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	N° Corrects	8.42 ± 2.58	9.96 ± 2.83	1.54 *
	Fast Response (s)	9.62 ± 2.17	7.83 ± 1.76	−1.79 **
	Medium Response (s)	14.20 ± 3.08	11.13 ± 2.03	−3.07 **
Word Recall	% corrects	67.14 ± 13.29	66.78 ± 13.34	−0.36
N-Back	1-Back (% corrects)	93.56 ± 10.65	93.08 ± 8.41	−0.48
	2-Back (% corrects)	82.64 ± 12.30	88.09 ± 9.47	5.45 *
	3-Back (% corrects)	72.17 ± 15.40	75.00 ± 14.47	2.83

Data submitted as means ± standard deviation (m ± sd). * $p < 0.05$. ** $p < 0.01$.

Table 4. HIFT Group. Descriptives of pre-test, post-test and differences.

	Variable	Pre-Test (m ± sd)	Post-Test (m ± sd)	Difference
Stroop	N° Corrects	8.62 ± 2.35	9.70 ± 2.38	1.08 *
	Fast Response (s)	8.87 ± 1.70	7.73 ± 1.57	-1.14 **
	Medium Response (s)	14.02 ± 3.48	11.86 ± 2.77	-2.16 **
Word Recall	% corrects	64.07 ± 13.08	68.51 ± 10.99	4.4
N-Back	1-Back (% corrects)	91.35 ± 11.37	90.87 ± 12.68	-0.48
	2-Back (% corrects)	77.80 ± 13.18	80.48 ± 14.89	2.68
	3-Back (% corrects)	72.10 ± 13.29	71.60 ± 13.78	-0.50

Data submitted as means ± standard deviation (m ± sd). * $p < 0.05$. ** $p < 0.01$.

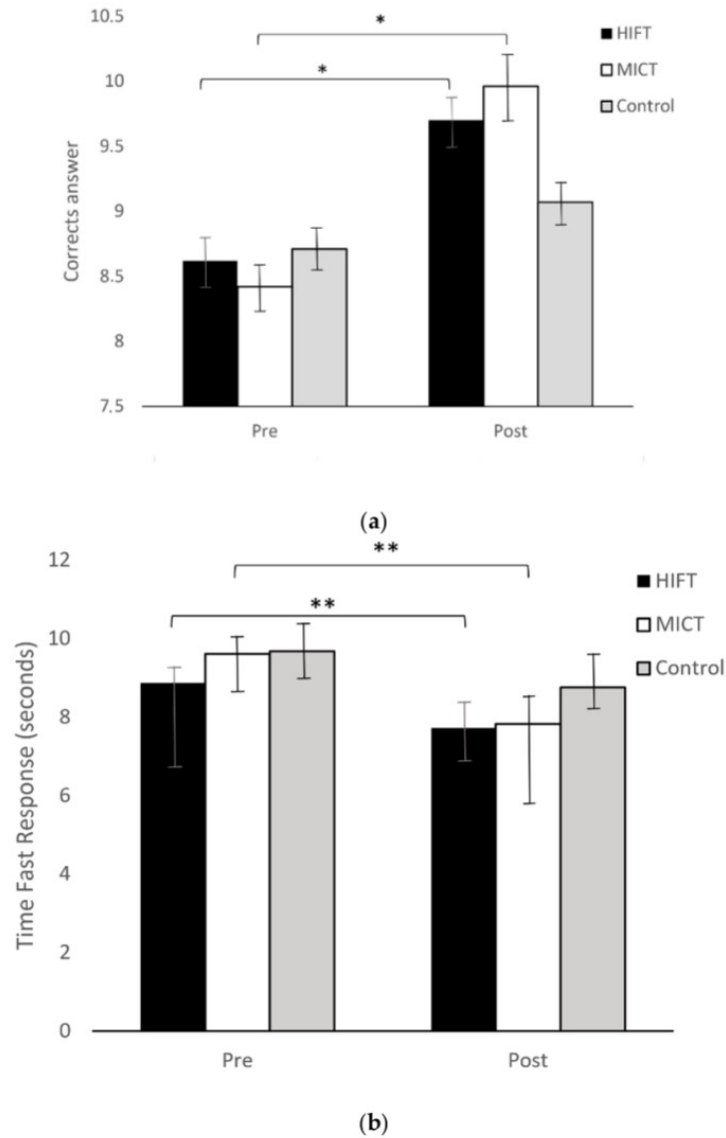


Figure 2. Cont.

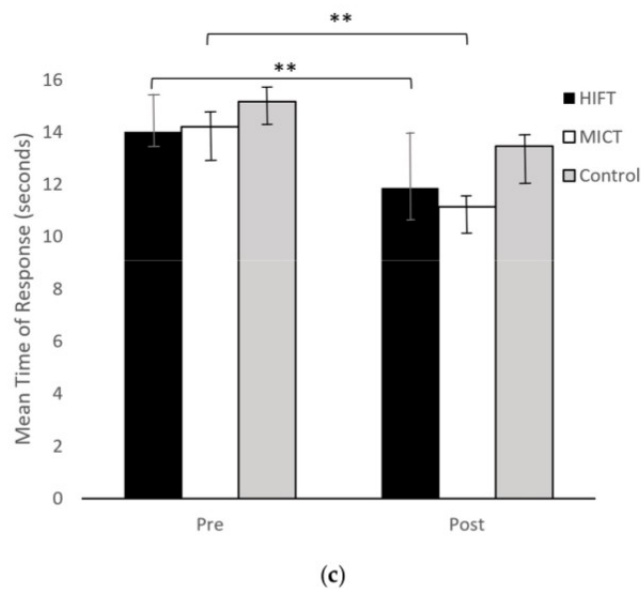


Figure 2. This figure shows the boxplot of the pre- and post-tests in the Stroop Test of each group in the three statistically significant variables. (a) Number of Correct Answers; (b) Fast Response Time; (c) Mean Response Time. * $p < 0.05$. ** $p < 0.01$.

4. Discussion

A growing body of research indicates that the development of training-induced brain adaptations may aid in the prevention or postponement of cognitive decline and neurodegenerative diseases; chronic exercise encourages synaptic plasticity, angiogenesis and neurogenesis [37–39] based on data from animal experiments. Additionally, human investigations have shown that, following several weeks of training, neurotrophic factor (BDNF) expression and hippocampus brain volume increase [40,41]. Although the majority of this study concentrates on interventions with continuous exercise over time, these stated exercise-induced alterations in the brain appear to result in increased cognitive performance.

The results obtained are in agreement with the evidence found by other authors. For example, Kim et al., in 2015 [42], found a non-significant increase in neurotrophic factors (BDNF, NGF, IGF-1) in university students after Taekwondo training with respect to the control group. However, in the Stroop test results, they were significantly different ($p < 0.05$) in the exercise group with respect to the control. These findings suggest that Taekwondo exercise training can enhance cognitive functions—particularly, selective attention and executive function. Regarding working memory, Van den Berg et al. [43] assessed cognitive performance, measured before and immediately after exercise, by varying the exercise duration time. They performed an attention test and the N-Back task to measure selective attention and working memory, respectively. There were no significant effects of exercise on selective attention (i.e., alertness, orienting or executive control) or working memory performance immediately after the exercise sessions. In addition, there were no differential effects of exercise duration. In summary, acute exercise lasting 10, 20 or 30 min did not improve but also did not impair the cognitive performance of young adolescents compared to a sedentary control group. On declarative memory, Kathryn’s 2008 study [44] also agrees with our results. The researchers evaluated the effects of a brief session of moderate exercise on executive function, short-term memory and long-term memory tests. Eighteen young adults (mean age 22.2 years, $sd \pm 1.6$) performed a game-changing test, a Brown–Peterson test and a Word Recall test before and after 40 min of moderate aerobic exercise on an ergometer bicycle, along with two control groups. After the exercise, they found

no increases in game changing or declarative memory, suggesting that exercise-induced arousal does not influence the executive function processes involved in working memory.

Chronic high-intensity training has been speculated to trigger adult neurogenesis, which is supported by recent data. For example, when Yarrow et al. (2010) [45] examined the association between overload training and BDNF expression, they detected elevated serum levels of the substance immediately after training. Furthermore, after 5 weeks of intervention, exercise-induced increases in BDNF were even more pronounced, suggesting the importance of this type of stimuli [46]. Higher serum levels of insulin-like growth factor-1 (IGF-1), which is related to neurogenesis and synaptogenesis [47], were measured after a 12-month intervention of overload training. Finally, Best et al. (2015) demonstrated that 52 weeks of overload training reduced age-related white matter atrophy in older women [48].

The strengths of the present study include the assessment of acute effects of HIFT and MICT training methods on cognitive functions. It is a new approach that differs substantially from those commonly employed in the literature in relation to exercise, which normally assess cognitive responses to prolonged training. Some limitations must be acknowledged concerning this study. The participants are all university students of physical education sciences, so their physiological and functional adaptations to exercise are above those the average university student; this could have reduced the acute effect of exercise on cognitive responses. Additionally, we must point out the limitations of the losses in the control group. Some of the participants only did the pre-test and not the post-test; others did both but made mistakes in one or more of the tests.

5. Conclusions

Based on the data obtained, high-intensity and moderate-intensity exercise seem to have acute effects on executive function and selective attention but not on declarative or working memory.

There is no significant evidence that the acute effects of both types of exercise are superior to rest, although the improvement of the means in the HIFT and MICT groups is greater than that of the control group.

Author Contributions: Conceptualization, J.D.J.-G. and M.d.D.-M.; methodology, J.D.J.-G. and M.d.D.-M.; software, M.d.D.-M.; validation, A.M.-A.; formal analysis, J.D.J.-G. and A.A.-A.; investigation, M.d.D.-M.; data curation, M.d.D.-M.; writing—F.Á.-S., J.D.J.-G. and M.d.D.-M.; writing—review and editing, A.O.-E.; visualization, C.B.-P.; supervision, A.M.-A.; project administration, J.D.J.-G.; funding acquisition, A.M.-A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by project 1260735, integrated into the 2014–2020 FEDER Operational Program in Andalusia.

Institutional Review Board Statement: This study was approved by the Ethics Committee of EADE University with protocol code 005/PE/TS/2022 (approved on 10 March 2022) and has been carried out according to the guidelines of the Declaration of Helsinki.

Informed Consent Statement: Before the study was carried out, all participants signed the informed consent form.

Data Availability Statement: The data shown in this study are available upon request from the corresponding author. The data are not available to the public given the sensitive nature of the questions asked in this study and the necessary guarantees of privacy and confidentiality.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Colcombe, S.; Kramer, A.F. Fitness Effects on the Cognitive Function of Older Adults: A Meta-Analytic Study. *Psychol. Sci.* **2003**, *14*, 125–130. [[CrossRef](#)]
2. Smith, P.J.; Blumenthal, J.A.; Hoffman, B.M.; Cooper, H.; Strauman, T.A.; Welsh-Bohmer, K.; Browndyke, J.; Sherwood, A. Aerobic Exercise and Neurocognitive Performance: A Meta-Analytic Review of Randomized Controlled Trials. *Psychosom. Med.* **2010**, *72*, 239–252. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

3. Bs, S.B.H.; Zelinski, E.M. Extended Practice and Aerobic Exercise Interventions Benefit Untrained Cognitive Outcomes in Older Adults: A Meta-Analysis. *J. Am. Geriatr. Soc.* **2012**, *60*, 136–141. [\[CrossRef\]](#)
4. McMorris, T.; Sproule, J.; Turner, A.; Hale, B.J. Acute, intermediate intensity exercise, and speed and accuracy in working memory tasks: A meta-analytical comparison of effects. *Physiol. Behav.* **2011**, *102*, 421–428. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Chang, Y.K.; Labban, J.D.; Gapin, J.I.; Etnier, J.L. The effects of acute exercise on cognitive performance: A meta-analysis. *Brain Res.* **2012**, *1453*, 87–101. [\[CrossRef\]](#)
6. Ludyga, S.; Gerber, M.; Brand, S.; Holsboer-Trachsler, E.; Pühse, U. Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis. *Psychophysiology* **2016**, *53*, 1611–1626. [\[CrossRef\]](#)
7. Groot, C.; Hooghiemstra, A.; Raijmakers, P.; van Berckel, B.; Scheltens, P.; Scherder, E.; van der Flier, W.; Ossenkuppele, R. The effect of physical activity on cognitive function in patients with dementia: A meta-analysis of randomized control trials. *Ageing Res. Rev.* **2016**, *25*, 13–23. [\[CrossRef\]](#)
8. Firth, J.; Stubbs, B.; Rosenbaum, S.; Vancampfort, D.; Malchow, B.; Schuch, F.; Elliott, R.; Nuechterlein, K.H.; Yung, A.R. Aerobic Exercise Improves Cognitive Functioning in People with Schizophrenia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Schizophr. Bull.* **2017**, *43*, 546–556. [\[CrossRef\]](#)
9. Northey, J.M.; Cherbuin, N.; Pampa, K.L.; Smeed, D.J.; Rattray, B. Exercise interventions for cognitive function in adults older than 50: A systematic review with meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* **2018**, *52*, 154–160. [\[CrossRef\]](#)
10. de Greeff, J.W.; Bosker, R.J.; Oosterlaan, J.; Visscher, C.; Hartman, E. Effects of physical activity on executive functions, attention and academic performance in preadolescent children: A meta-analysis. *J. Sci. Med. Sport* **2018**, *21*, 501–507. [\[CrossRef\]](#)
11. Song, D.; Yu, D.S.; Li, P.W.; Lei, Y. The effectiveness of physical exercise on cognitive and psychological outcomes in individuals with mild cognitive impairment: A systematic review and meta-analysis. *Int. J. Nurs. Stud.* **2018**, *79*, 155–164. [\[CrossRef\]](#)
12. Yerkes, R.M.; Dodson, J.D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *J. Comp. Neurol. Psychol.* **1908**, *18*, 459–482. [\[CrossRef\]](#)
13. Mekari, S.; Fraser, S.; Bosquet, L.; Bonnéry, C.; Labelle, V.; Pouliot, P.; Lesage, F.; Bherer, L. The relationship between exercise intensity, cerebral oxygenation and cognitive performance in young adults. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2015**, *115*, 2189–2197. [\[CrossRef\]](#)
14. Smith, M.; Tallis, J.; Miller, A.; Clarke, N.; Guimarães-Ferreira, L.; Duncan, M. The effect of exercise intensity on cognitive performance during short duration treadmill running. *J. Hum. Kinet.* **2016**, *51*, 27–35. [\[CrossRef\]](#)
15. Moreau, D.; Chou, E. The Acute Effect of High-Intensity Exercise on Executive Function: A Meta-Analysis. *Perspect. Psychol. Sci.* **2019**, *14*, 734–764. [\[CrossRef\]](#)
16. Tsai, C.-L.; Wang, C.-H.; Pan, C.-Y.; Chen, F.-C.; Huang, T.-H.; Chou, F.-Y. Executive function and endocrinological responses to acute resistance exercise. *Front. Behav. Neurosci.* **2014**, *8*, 262. [\[CrossRef\]](#)
17. Chang, H.; Kim, K.; Jung, Y.-J.; Kato, M. Effects of Acute High-Intensity Resistance Exercise on Cognitive Function and Oxygenation in Prefrontal Cortex. *J. Exerc. Nutr. Biochem.* **2017**, *21*, 1–8. [\[CrossRef\]](#)
18. Lambourne, K.; Tomporowski, P. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: A meta-regression analysis. *Brain Res.* **2010**, *1341*, 12–24. [\[CrossRef\]](#)
19. Dietrich, A.; Audiffren, M. The reticular-activating hypofrontality (RAH) model of acute exercise. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **2011**, *35*, 1305–1325. [\[CrossRef\]](#)
20. Izquierdo, M.; Ibañez, J.; Calbet, J.A.L.; Navarro-Amezqueta, I.; González-Izal, M.; Idoate, F.; Häkkinen, K.; Kraemer, W.J.; Palacios-Sarrasqueta, M.; Almar, M.; et al. Cytokine and hormone responses to resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2009**, *107*, 397–409. [\[CrossRef\]](#)
21. Wang, C.-C.; Chu, C.-H.; Chu, I.-H.; Chan, K.-H.; Chang, Y.-K. Executive function during acute exercise: The role of exercise intensity. *J. Sport Exerc. Psychol.* **2013**, *35*, 358–367. [\[CrossRef\]](#)
22. Browne, S.E.; Flynn, M.J.; O'Neill, B.V.; Howatson, G.; Bell, P.G.; Haskell-Ramsay, C.F. Effects of acute high-intensity exercise on cognitive performance in trained individuals: A systematic review. *Prog. Brain Res.* **2017**, *234*, 161–187. [\[CrossRef\]](#)
23. French, D.N.; Kraemer, W.J.; Volek, J.S.; Spiering, B.A.; Judelson, D.A.; Hoffman, J.R.; Maresh, C.M. Anticipatory responses of catecholamines on muscle force production. *J. Appl. Physiol.* **2007**, *102*, 94–102. [\[CrossRef\]](#)
24. Anders, J.P.V.; Kraemer, W.J.; Newton, R.U.; Post, E.M.; Caldwell, L.K.; Beeler, M.K.; DuPont, W.H.; Martini, E.R.; Volek, J.S.; Häkkinen, K.; et al. Acute Effects of High-intensity Resistance Exercise on Cognitive Function. *J. Sports Sci. Med.* **2021**, *20*, 391–397. [\[CrossRef\]](#)
25. Audiffren, M.; Tomporowski, P.D.; Zagrodnik, J. Acute aerobic exercise and information processing: Energizing motor processes during a choice reaction time task. *Acta Psychol.* **2008**, *129*, 410–419. [\[CrossRef\]](#)
26. Audiffren, M.; Tomporowski, P.D.; Zagrodnik, J. Acute aerobic exercise and information processing: Modulation of executive control in a Random Number Generation task. *Acta Psychol.* **2009**, *132*, 85–95. [\[CrossRef\]](#)
27. Wilke, J.; Giesche, F.; Klier, K.; Vogt, L.; Herrmann, E.; Banzer, W. Acute Effects of Resistance Exercise on Cognitive Function in Healthy Adults: A Systematic Review with Multilevel Meta-Analysis. *Sports Med.* **2019**, *49*, 905–9166. [\[CrossRef\]](#)
28. Querido, J.S.; Sheel, A.W. Regulation of Cerebral Blood Flow during Exercise. *Sports Med.* **2007**, *37*, 765–782. [\[CrossRef\]](#)
29. Ogoh, S.; Ainslie, P.N. Regulatory mechanisms of cerebral blood flow during exercise: New concepts. *Exerc. Sport Sci. Rev.* **2009**, *37*, 123–129. [\[CrossRef\]](#)
30. Grooms, D.; Appelbaum, G.; Onate, J. Neuroplasticity Following Anterior Cruciate Ligament Injury: A Framework for Visual-Motor Training Approaches in Rehabilitation. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **2015**, *45*, 381–393. [\[CrossRef\]](#)

31. Wilkerson, G.B. Neurocognitive Reaction Time Predicts Lower Extremity Sprains and Strains. *Int. J. Athl. Ther. Train.* **2012**, *17*, 4–9. [[CrossRef](#)]
32. Pontifex, M.B.; Hillman, C.H.; Fernhall, B.; Thompson, K.M.; Valentini, T.A. The Effect of Acute Aerobic and Resistance Exercise on Working Memory. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2009**, *41*, 927–934. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Johnson, L.; Addamo, P.K.; Raj, I.S.; Borkoles, E.; Wyckelsma, V.; Cyarto, E.; Polman, R. An Acute Bout of Exercise Improves the Cognitive Performance of Older Adults. *J. Aging Phys. Act.* **2016**, *24*, 591–598. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Goldstein, E. *Cognitive Psychology: Connecting mind, Research and Everyday Experience*, 4th ed.; Wadsworth Publishing: Belmont, CA, USA, 2014.
35. Stroop, J.R. Studies of interference in serial verbal reactions. *J. Exp. Psychol. Gen.* **1992**, *121*, 15–23. [[CrossRef](#)]
36. Sibley, B.A.; Etnier, J.L.; Le Masurier, G.C. Effects of an Acute Bout of Exercise on Cognitive Aspects of Stroop Performance. *J. Sport Exerc. Psychol.* **2006**, *28*, 285–299. [[CrossRef](#)]
37. Crawford, J.R.; Parker, D. *A Handbook of Neuropsychological Assessment*; McKinlay, W.W., Ed.; Psychology Press: London, UK, 1992.
38. Vaynman, S.; Gomez-Pinilla, F. License to Run: Exercise Impacts Functional Plasticity in the Intact and Injured Central Nervous System by Using Neurotrophins. *Neurorehabilit. Neural Repair* **2005**, *19*, 283–295. [[CrossRef](#)]
39. Thomas, A.G.; Dennis, A.; Bandettini, P.A.; Johansen-Berg, H. The Effects of Aerobic Activity on Brain Structure. *Front. Psychol.* **2012**, *3*, 86. [[CrossRef](#)]
40. Liu, P.Z.; Nusslock, R. Exercise-Mediated Neurogenesis in the Hippocampus via BDNF. *Front. Neurosci.* **2018**, *12*, 52. [[CrossRef](#)]
41. Kandola, A.; Hendrikse, J.; Lucassen, P.J.; Yücel, M. Aerobic Exercise as a Tool to Improve Hippocampal Plasticity and Function in Humans: Practical Implications for Mental Health Treatment. *Front. Hum. Neurosci.* **2016**, *10*, 373. [[CrossRef](#)]
42. Kim, Y. The effect of regular Taekwondo exercise on Brain-derived neurotrophic factor and Stroop test in undergraduate student. *J. Exerc. Nutr. Biochem.* **2015**, *19*, 73–79. [[CrossRef](#)]
43. Berg, V.V.D.; Saliassi, E.; Jolles, J.; De Groot, R.H.M.; Chinapaw, M.; Singh, A.S. Exercise of Varying Durations: No Acute Effects on Cognitive Performance in Adolescents. *Front. Neurosci.* **2018**, *12*, 672. [[CrossRef](#)]
44. Coles, K.; Tomporowski, P.D. Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory. *J. Sports Sci.* **2008**, *26*, 333–344. [[CrossRef](#)]
45. Yarrow, J.F.; White, L.J.; McCoy, S.C.; Borst, S.E. Training augments resistance exercise induced elevation of circulating brain derived neurotrophic factor (BDNF). *Neurosci. Lett.* **2010**, *479*, 161–165. [[CrossRef](#)]
46. Etsai, C.-L.; Wang, C.-H.; Epan, C.-Y.; Echen, F.-C. The effects of long-term resistance exercise on the relationship between neurocognitive performance and GH, IGF-1, and homocysteine levels in the elderly. *Front. Behav. Neurosci.* **2015**, *9*, 23. [[CrossRef](#)]
47. Nieto-Estévez, V.; Defterali, Ç.; Vicario-Abejón, C. IGF-I: A key growth factor that regulates neurogenesis and synaptogenesis from embryonic to adult stages of the brain. *Front. Neurosci.* **2016**, *10*, 52. [[CrossRef](#)]
48. Best, J.R.; Chiu, B.K.; Hsu, C.L.; Nagamatsu, L.S.; Liu-Ambrose, T. Long-Term Effects of Resistance Exercise Training on Cognition and Brain Volume in Older Women: Results from a Randomized Controlled Trial. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* **2015**, *21*, 745–756. [[CrossRef](#)]

