

Cambios en la estructura y función cerebral asociados al entrenamiento aeróbico a lo largo de la vida. Una revisión teórica

J.A. Guzmán-Cortés¹
A.F. Villalva-Sánchez²
J. Bernal^{1,2}

¹ *Universidad Nacional Autónoma de México*

² *Instituto de Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas*

El objetivo de la presente revisión fue analizar la evidencia experimental que sugiere un papel benéfico del entrenamiento aeróbico, en la estructura y funcionamiento cerebral, en las diversas etapas de la vida de población sana. Se seleccionaron 30 artículos registrados en PubMed, ScienceDirect y Scopus de los últimos 10 años. Los estudios señalan que el entrenamiento aeróbico en cada etapa de la vida, tiene un impacto positivo sobre el funcionamiento ejecutivo, velocidad de procesamiento, atención y memoria, y produce cambios en la corteza prefrontal y temporal principalmente.

Palabras clave: ejercicio aeróbico, plasticidad cerebral, funciones cognitivas, entrenamiento físico.

Changes in brain structure and function associated with aerobic training throughout life. A theoretical review

The aim of this review was to analyze the experimental research literature suggesting a beneficial role of aerobical exercise training on brain structure and function throughout the life span in non-pathological populations, through a search of articles published from 2004 to date, in PubMed, ScienceDirect and Scopus data. Thirty articles were selected to analyze. Studies show that aerobic training at each stage of life has a positive impact on various

cognitive processes, executive functions, processing speed, attention and memory, and produce changes in brain structure like prefrontal and temporal cortex.

Keywords: Aerobic exercise, brain plasticity, cognitive functioning, physical exercise.

Introducción

Desde la antigua Grecia se intuía la importancia que tiene la práctica deportiva para la salud física y mental; por lo que el ejercicio físico se convirtió en un elemento esencial en actividades sociales, hasta el punto de desarrollar de forma paralela y con la misma importancia, el estudio filosófico y las competencias deportivas. Así lo denota la frase *mens sana in corpore sano*, que es quizá una de las primeras aproximaciones a la relación entre el ejercicio físico y los procesos mentales.

No obstante, es hasta la última década, que ha aumentado el número de estudios acerca del papel del ejercicio físico en el funcionamiento cerebral humano, posiblemente impulsado por el desarrollo de métodos de neuroimagen. Estos estudios han mostrado que, gracias al ejercicio, es posible prevenir el deterioro cognoscitivo durante el envejecimiento (Angevaeren, Aufdemkampe, Verhaar, Aleman y Vanhees, 2008; Franco-Martín, Parra-Vidales, González-Palau, Bernate-Navarro y Solis, 2013) y aumenta la reserva cognoscitiva en adultos y niños (Best, 2010; Davis et al., 2011; Erickson, Miller, Weinstein, Akl y Banducci, 2012). Asimismo, existen evidencias de beneficios a la salud en los sistemas cardiorrespiratorio (Janssen, 2007), metabólicos (Janssen y Leblanc, 2010), musculoesqueléticos (Vicente-Rodríguez et al., 2006) y psicológicos (Jiménez, Martínez, Miró y Sánchez, 2008; Torres, De Vaca, Morales y Sánchez, 2008), además reduce el riesgo de padecer enfermedades como son: hipertensión, diabetes, obesidad, enfermedades cardíacas y accidentes cerebrovasculares, entre otras (OMS, 2010).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010), la inactividad física es el cuarto factor de riesgo de mortalidad más importante a nivel mundial, sólo la superan la hipertensión, el consumo de tabaco y el exceso de glucosa en la sangre. En este contexto, ha aumentado el número de investigaciones con el objetivo de estudiar los beneficios cognoscitivos que conlleva el ejercicio físico a lo largo de la vida.

Dado lo anterior, resulta pertinente la revisión de los datos experimentales aportados por las neurociencias, sobre los efectos del ejercicio físico en el funcionamiento cerebral en humanos sanos a lo largo de la vida. Estos datos podrían ayudar a crear diversas metodologías para la prevención del deterioro cognoscitivo y las enfermedades neurodegenerativas.

La presente revisión tuvo como objetivo conocer el estado del arte de la relación ejercicio aeróbico y cerebro a lo largo de la vida. Se analizó el sustento teórico de algunas hipótesis que sugieren un papel benéfico del entrenamiento aeróbi-

co en el funcionamiento cerebral, basados en los hallazgos que se describen en dos tópicos: cambios estructurales y cambios en el funcionamiento cognoscitivo (FC).

Se hizo una búsqueda de investigaciones en las bases de datos ScienceDirect, PubMed y Scopus, utilizando las palabras clave: '*aerobic exercise and brain changes*' y '*aerobic exercise and cognition*'.

Se seleccionaron los artículos con los siguientes filtros incluidos en las bases de datos mencionadas: de enero 2004 a febrero 2015, en inglés o español, investigaciones realizadas en humanos y que el diseño experimental fuera aleatorizado, de comparación o longitudinal.

Posteriormente, se leyeron los resúmenes y se seleccionaron aquellos trabajos donde la variable independiente fuera el entrenamiento aeróbico, que no hiciera referencia a grupos con alguna patología como depresión, enfermedades neurodegenerativas, deterioro cognitivo leve o traumatismo craneoencefálico.

Una vez seleccionados, los artículos se categorizaron en tres grupos de edad: niños, adultos y adultos mayores.

Finalmente, se revisaron 30 artículos que cumplieron con los criterios establecidos. La figura 1 (ver página siguiente) muestra el proceso de búsqueda bibliográfica y el número de artículos que se incluían en cada etapa del proceso.

Además de los resultados, se analizaron algunas de las características metodológicas que sirvieran para comparar los resultados de los trabajos entre sí y encontrar los parámetros del entrenamiento que ofrecieran los mejores beneficios a nivel cerebral. Así, se registraron las pruebas utilizadas para evaluar a los sujetos, tipo de ejercicio, duración total de los entrenamientos, frecuencia semanal y duración por sesión. Las tablas 1, 2 y 3 muestran estos datos para niños, adultos y adultos mayores respectivamente. Como se puede observar, en los tres grupos de edad existen diferencias importantes entre los programas de entrenamiento y las pruebas utilizadas para la evaluación de los sujetos. Por ejemplo, las actividades deportivas podían incluir atletismo, basketball, bicicleta, caminadora, etc., o no se especifican y las pruebas de evaluación también cambian entre los estudios.

Efectos del entrenamiento físico en la estructura y funcionamiento cerebral

Niños y adolescentes

Los estudios encontrados abarcan muestras entre 11 y 17 personas entre 7 y 16 años de edad. Aunque en esta etapa es difícil establecer una relación directa entre el ejercicio físico y los cambios corticales asociados al entrenamiento debido al rápido desarrollo cerebral (Best 2010; Davis et al., 2011), se reportan mayores puntuaciones en tareas de memoria (Chaddock et al., 2010a) y atención selec-

tiva (Chaddock et al., 2010b) en niños con mejor condición física. Estos puntajes se relacionaron con un mayor volumen en el hipocampo (Chaddock et al., 2010a) y en los ganglios basales (Chaddock et al., 2010b), evidenciados por medio de Resonancia Magnética (RM).

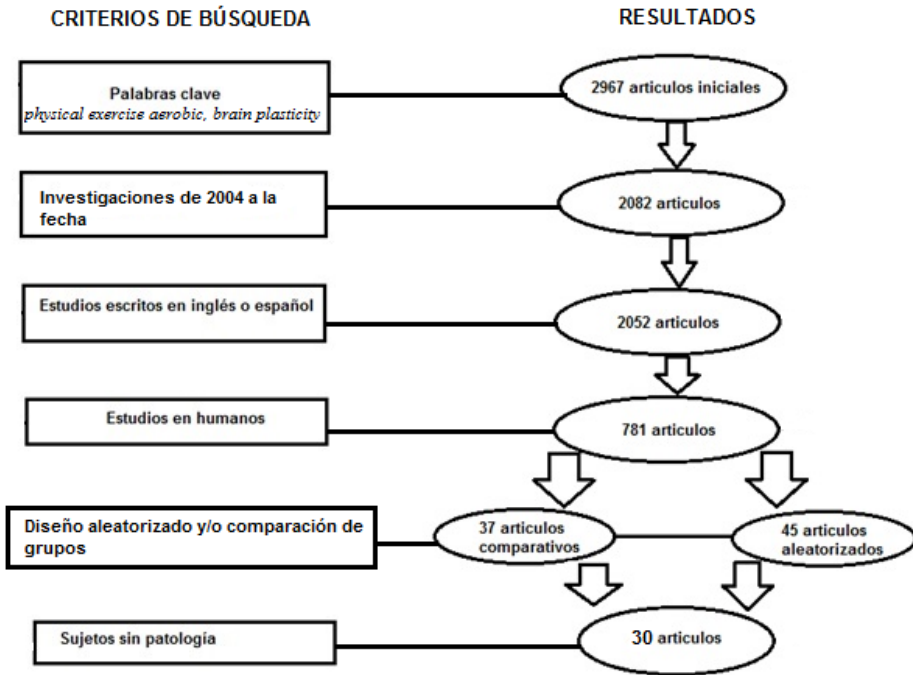


Figura 1. Proceso de búsqueda y selección de artículos.

Otros estudios conductuales muestran efectos positivos en el FC de niños sometidos a programas de entrenamiento aeróbico en: funciones ejecutivas (FE) (Davis et al. 2007; Tomporowski, Davis, Miller y Naglieri, 2008; Stroth et al., 2009; Davis et al., 2011), atención (Budde, Voelcker-Rehage, Pietrabyk-Kendziorra, Riveiro y Tidow, 2008; Stroth et al., 2009), memoria (Pesce, Crova, Cereatti, Casella y Belluci, 2009) y tiempo de reacción (Elleberg y St Louis-Deschenes, 2010). Además, se han observado mejorías en aritmética (Davis et al., 2011) y lecto-escritura (Hillman et al., 2009; Schneider, Vogt, Frysch, Guardia y Strüder, 2009).

TABLA 1. ESTUDIOS REALIZADOS EN NIÑOS Y ADOLESCENTES.

<i>Fuente</i>	<i>Entrenamiento</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Principales resultados</i>
Budde et al. (2008)	Una sesión de 10 min Ejercicios de coordinación y circuito aeróbico	D2	Mejorías en atención en ambos tipos de entrenamiento.
Chaddock et al. (2010a)	No especificado	Flanker task RM	Mejor atención y mayor volumen de los ganglios basales.
Chaddock et al. (2010b)	No especificado	Memoria visual RM	Mejor ejecución de tareas de memoria y mayor volumen del hipocampo.
Davis et al. (2007)	15 semanas (20-40 min 5 días a la semana) Atletismo, soccer y basketball.	CAS	Mejor rendimiento en pruebas que evalúan FE.
Davis et al. (2011)	13 semanas (20-40 min. diarios) Atletismo, soccer y basketball.	CAS, AE	Mejor ejecución en pruebas que evalúan FE y matemáticas (incremento en la activación pre frontal bilateral).
Ellenberg y St-Louis-Deschenes (2010)	Una sesión de 30 min bicicleta fija	Tiempos de Reacción y FE	Mejoría en tiempos de reacción justo después de hacer ejercicio.
Hillman et al. (2009)	Una sesión de 20 min caminadora	Flanker test PRE's	Mayor amplitud en P300 y mejor desempeño en habilidades escolares.
Pesce et al. (2009)	Una sesión de 38-42 min. Circuito de entrenamiento y juegos en equipo	Aprendizaje de palabras	Las dos formas de ejercicio ayudan a la consolidación de la memoria.
Schneider et al. (2008)	Una sesión de 15 min Bicicleta fija	sLORETA (EEG) AE	Mejora en AE. Mayor activación neurofisiológica (aumento del ritmo alfa) después del ejercicio físico en área precuneal.
Stroth et al. (2009)	No especificado entrenamiento a largo plazo y una sesión de 20 min de bicicleta fija.	Flanker Task PRE's	Mayor desempeño en atención en niños con adecuada condición física y mayor amplitud en el componente CNV
Tompson et al. (2008)	Una sesión de 23 min. Caminadora	Switching Task CAS	Mayor desempeño en pruebas de inhibición de procesos automatizados

Nota. CAS=CognitiveAssesmentSystem, AE=Aprovechamiento Escolar, EEG=Electroencefalograma, PRE's=Potenciales Relacionados con Eventos, CNV=Variación Contingente Negativa (siglas en inglés), FE= Funciones Ejecutivas, RM= Resonancia Magnética, D2= Prueba de cancelación que evalúa atención selectiva.

Adultos

Los estudios incluyen muestras entre 14 y 57 personas entre 18 y 30 años. Se reportan mejorías en el funcionamiento motor, FE, memoria de trabajo, atención, velocidad de procesamiento, habilidades viso-espaciales e inhibición (Harada, Okagawa y Kubota, 2004; Coles y Tomporowski, 2008; Smith et al, 2010; Yanagisawa et al., 2010; O'Leary, Pontifex, Scudder, Brown y Hillman, 2011; Padilla, Pérez y Andrés, 2014). No obstante, en algunos estudios los beneficios obtenidos disminuyen significativamente cuando se interrumpe el entrenamiento, lo que sugiere que la continuidad es importante para preservar el beneficio cognoscitivo. Estos efectos podrían estar relacionados con incrementos en el nivel de oxigenación cerebral, debido a un mayor flujo sanguíneo e incremento en la densidad vascular de la corteza cerebral producto del ejercicio aeróbico continuo (Harada et al., 2004).

Muchos de los estudios en este rango de edad están enfocados en estudiar los efectos del entrenamiento físico profesional y se centran en los cambios cerebrales en atletas de élite, ya que esta situación ofrece una gran oportunidad para el estudio de la plasticidad cerebral (Erickson, Hillman y Kramer, 2015). Las comparaciones de estos atletas con adultos que no practican deporte, muestran mayor volumen de la materia gris en los atletas de élite, lo que puede deberse a la práctica y entrenamiento continuos de los movimientos propios de la especialidad (Jacini et al., 2009; Wei y Luo, 2010).

Jacini et al. (2009), analizaron las diferencias en la estructura cerebral de 8 judocas que llevaban entrenando 10 años aproximadamente, de 5-6 horas diarias y un grupo control de personas sedentarias, pareadas por edad y escolaridad. Por medio de RM, se evidenció un mayor volumen de materia gris en los lóbulos frontales de los judocas. De acuerdo con los autores, estas modificaciones pueden ser inducidas por la demanda impuesta por el tipo de actividades específicas en este deporte. Otros estudios también han mostrado una asociación entre la práctica de un entrenamiento físico a largo plazo y una mayor densidad en la materia gris de la corteza prefrontal, la cual se relaciona con la planificación y ejecución motora compleja (Nakata, Yoshie, Miura y Kudo, 2010). Así, la repetición de un entrenamiento específico durante largo tiempo, da lugar a la transformación de las conexiones y estructura cerebral (Yarrow, Brown y Krakauer, 2009).

Wei y Luo (2010), estudiaron la activación cerebral en un paradigma denominado *imagery task*, por medio de RM funcional, en 12 buzos profesionales y 12 novatos. Los participantes tenían que imaginar la realización de movimientos simples (levantarse, alzar un brazo, etc.) y movimientos complejos como zambullirse en el agua y otras habilidades profesionales. Los atletas mostraron mayor activación en el parahipocampo cuando imaginaban realizar una destreza profesional, mientras que los novatos no. Cabe señalar, que no se mostró diferencia significativa en la activación cerebral al imaginar habilidades motoras simples.

TABLA 2. ESTUDIOS REALIZADOS EN ADULTOS.

<i>Fuente</i>	<i>Entrenamiento</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Principales resultados</i>
Coles y Tomporowski (2007)	Una sesión de 40 min bicicleta fija	Set-switching test y tarea de recuerdo libre.	El ejercicio no facilitó el cambio de set ni el recuerdo a corto plazo, pero sí a largo plazo.
Del Percio et al. (2010)	Entrenamiento en karate durante 10 años, 5 veces a la semana.	PRE's	Se observa una mayor sincronización en la actividad eléctrica en la zona occipital en los atletas durante tareas visoespaciales.
Griffin et al. (2011)	1 hora de bicicleta fija, 3 veces por semana durante 5 semanas.	Stroop Face-name matching task	Incremento en los niveles de BDNF que se relacionan con la mejoría en pruebas de memoria e inhibición.
Harada et al. (2004)	30 min de caminata 3 veces a la semana durante 12 semanas.	-Branching task -Go/No-Go -Tiempo de reacción -Spatial Delayed-Response Test	Mejor desempeño en tareas que evalúan las FE.
Jacini et al. (2009)	5 hrs diarias por 10 años de judo aprox.	RM	Mayor densidad de la materia gris en lóbulo frontal, parietal y temporal en practicantes expertos de judo.
O'Leary et al. (2011)	Una sesión de caminadora por 20 min.	Flanker test PRE's	Incremento en la amplitud de P3 que se relaciona con mayor asignación de recursos atencionales y un mayor control de interferencia.
Padilla et al., (2014)	Entrenamiento aeróbico durante al menos 10 años 6 hrs por semana.	Control inhibitorio Automatic Operation Span	Mejor desempeño en tareas que evalúan la memoria de trabajo y la inhibición de interferencias.
Tang et al. (2008)	En una sesión de 15 min de ejercicio en banco.	Niveles de BDNF	En el incremento de ejercicio aeróbico aumentan los niveles de BDNF.
Wei y Luo (2010)	Entrenamiento en buceo durante 10 años.	RM	Mayor activación en el parahipocampo y áreas prefrontales.

Nota. BDNF= Brain-Derived Neurotrophic Factor, fNIRS= espectroscopia infrarroja cercana funcional, RM= Resonancia Magnética, PRE's= Potenciales Relacionados a Eventos, FE= Funciones Ejecutivas, CPF= Corteza Pre Frontal.

Otro dato importante de esta investigación es que se activaron zonas prefrontales de los atletas al realizar ambas tareas, debido posiblemente al alto orden de control motor de movimientos complejos voluntarios.

Ahora bien, los cambios en el FC, se han atribuido a una mayor neuroeficiencia, concepto que se refiere a un ahorro energético en recursos neuronales, al tiempo que existe una mayor eficiencia en el procesamiento cognoscitivo (Del Percio et al., 2010; Rooks, Thom, McCully y Dishman, 2010). La neuroeficiencia producida por el largo entrenamiento físico, se caracteriza por requerir menos recursos cerebrales para realizar ciertas actividades, que se traduce en una mayor capacidad del funcionamiento cortical.

Adultos mayores

Actualmente un tema de los más estudiados, debido a sus implicaciones sociales, es el análisis de factores protectores y estresores que intervienen en el envejecimiento a nivel cerebral. Esto se debe, en parte, al envejecimiento de la población en países industrializados y a la necesidad de medidas de prevención ante enfermedades neurodegenerativas.

Los estudios incluyen muestras entre 16 y 120 personas entre 60 y 79 años. Colcombe et al. (2006), encontraron un incremento en el volumen de materia gris y blanca, en los lóbulos temporal y frontal en adultos mayores bajo entrenamiento aeróbico.

Asimismo, se han observado cambios funcionales en las cortezas prefrontal y parietal asociados a mejores puntuaciones en tareas conductuales de inhibición (*flanker test*) y atención selectiva visoespacial bajo entrenamiento físico durante más de 6 meses (Colcombe et al., 2004). Además, se han descrito mejorías en FE (Baker et al., 2010; Hyodo et al., 2012; Voss et al., 2010; Kimura y Hozumi, 2012; Berchicci, Lucci y Di Russo, 2013), memoria (Erickson et al., 2011) y memoria episódica (Ruscheweyh et al., 2011) asociadas a mayor activación prefrontal e hipocampo.

Estos datos sugieren que el ejercicio físico ofrece protección neuronal (Podewils et al., 2005; Kramer y Erickson, 2007) y un incremento en las conexiones neuronales (Rojas-Vega et al., 2008).

En el envejecimiento, el peso del cerebro disminuye del 10 al 20% y el flujo sanguíneo se reduce entre un 30-40%, estos cambios dan lugar a alteraciones de memoria, atención, FE y reducción en la capacidad de aprendizaje (Tseng, Gau y Lou, 2011). De esta forma, el ejercicio físico parece ser un factor protector ante el declive neurodegenerativo en adultos mayores con o sin demencia (Franco-Martín et al., 2013), ya que los procesos cognoscitivos beneficiados al realizar ejercicio físico son aquellos que se deterioran con el envejecimiento.

TABLA 3. RESUMEN DE LOS ESTUDIOS QUE APORTAN EVIDENCIA DE BENEFICIOS CEREBRALES EN ADULTOS MAYORES.

<i>Fuente</i>	<i>Entrenamiento</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Principales resultados</i>
Berchicci et al. (2013)	Nado, artes marciales y esgrima. 1 hora, 3 veces por semana. No especificado tiempo total.	FE EEG	Mayor velocidad en la planeación y ejecución de respuestas, mejoras en las FE. Mejoría electrofisiológica en región prefrontal.
Baker et al. (2010)	Caminadora, elíptica y bicicleta fija. 45 a 60 min por día, 4 veces por semana durante 6 meses.	FE Memoria declarativa	Mejoría en las pruebas de FE. No existió diferencia en memoria.
Colcombe et al. (2004)	Caminata o estiramiento de ligas, 45 min, 3 días por semana, 3 meses.	RMf -Flanker Test	Mayor activación de regiones prefrontales y parietales con mejoras en atención visoespacial y control inhibitorio.
Colcombe et al. (2006)	Aeróbico 1 hora, 3 días a la semana, durante 6 meses	RM	Incremento del volumen cerebral en el giro temporal superior izquierdo y derecho, la corteza anterior cingulada y la corteza motora suplementaria.
Erickson et al. (2011)	Aeróbico, 40 min 3 días por semana durante 6 meses.	Memoria espacial RM Niveles de BDNF	Incremento del volumen hipocámpal, mayores niveles de BDNF, mayor rendimiento en tareas de memoria visoespacial.
Hyodo et al. (2012)	Bicicleta fija, efecto agudo de una sesión de 10 min.	Prueba Stroop fNIRS	Mejoría en la prueba stroop relacionada con una mayor activación bilateral prefrontal.
Kimura y Hozumi (2012)	Baile, 40 min al día, plazo no especificado.	Task-switching reaction	Mejoras en el rendimiento de pruebas que evalúan el control ejecutivo.
Ruscheweyh et al. (2011)	Gimnasia y caminata nórdica, 50 min, de 3- 5 veces por semana, durante 6 meses.	Memoria episódica RM Niveles de BDNF	Incremento en volumen cortical (materia gris) en áreas prefrontales y corteza cingulada. Mayor rendimiento en tareas de memoria.
Voss et al. (2010)	Caminata, 30 min, 2-3 veces por semana durante un año.	-Span de dígitos -Prueba de memoria de trabajo visual -WSCT -Task-Switching - RMF	Incremento en la conectividad de la corteza frontal, temporal y parietal, mejoría significativa en el desempeño de las FE.

Nota. BDNF= Brain-Derived Neurotrophic Factor, fNIRS= espectroscopia infrarroja cercana funcional, RM= Resonancia Magnética RMf= Resonancia Magnética Funcional, FE= Funciones Ejecutivas, WSCT= Wisconsin Card Sorting Test, CPF= Corteza Pre Frontal.

Mecanismos neurobiológicos

Han surgido distintas explicaciones acerca de los mecanismos neurobiológicos que se ponen en marcha con el ejercicio aeróbico. Existe un aumento de serotonina, que se ha asociado a la reducción de los síntomas en depresión y ansiedad (Wipfli, Landers, Nagoshi y Ringenbach, 2011). Del mismo modo, se señala que el ejercicio físico tiene un efecto benéfico a nivel molecular, al incrementar la plasticidad en redes sinápticas, por medio de la producción de factores tróficos que intervienen en la supervivencia y crecimiento neuronal como el brain-derived neurotrophic factor (BDNF, por sus siglas en inglés) (Binder y Scharfman, 2004; Tang, Chu, Hui, Helmeste y Law, 2008; Voss, et al., 2010). El BDNF provee soporte vital para las neuronas colinérgicas del cerebro anterior, un sitio relacionado con la degeneración causada por la enfermedad de Alzheimer o la edad. En el humano el ejercicio físico mejora el rendimiento cognoscitivo e incrementa la disponibilidad de BDNF aumentando el volumen del hipocampo en adultos mayores (Erickson et al., 2011) y adultos jóvenes (Tang et al., 2008; Griffin et al., 2011). Así, la expresión aumentada del BDNF inducida por el ejercicio, podría ayudar a incrementar la resistencia al deterioro cognoscitivo, al daño y la degeneración de las neuronas, haciendo que este factor trófico sustente el crecimiento y la funcionalidad de estas células (Nieto-Sampedro, 2010).

Discusión

Los trabajos revisados muestran que el FC mejora a consecuencia del entrenamiento físico, en procesos específicos como FE, memoria, atención, ejecución motora compleja y velocidad de procesamiento. Sin embargo, no todos estos procesos resultan beneficiados en los 3 grupos de edad.

En la infancia, los principales procesos favorecidos por el ejercicio físico son las FE, atención y memoria. No obstante, el número de participantes es pequeño y los procesos cognoscitivos estudiados son limitados, por lo que no queda claro si estas funciones son las únicas que se benefician con el entrenamiento. Por otra parte, aunque se pueden atribuir al ejercicio aeróbico los cambios observados en las funciones cognoscitivas estudiadas, los tiempos de entrenamiento no están bien especificados en las investigaciones, lo cual dificulta establecer un programa de entrenamiento efectivo para lograr beneficios cerebrales. Aunque se han reportado diferencias en el volumen de ganglios basales e hipocampo después de un período de entrenamiento aeróbico, es difícil establecer en su totalidad las regiones cerebrales involucradas en los cambios cognoscitivos reportados, por lo que es necesario un mayor número de estudios neurofisiológicos y con neuroimagen para precisar estas regiones.

Los individuos adultos presentan mejoras en el funcionamiento motor y velocidad de procesamiento, además de los beneficios reportados en niños y adul-

tos mayores. Asimismo, muestran mayor activación y/o aumento en la densidad cortical en los lóbulos frontal, parietal, temporal y occipital asociados a mejoras en las funciones que sustentan cada una de estas zonas corticales.

No obstante, algunos de los trabajos revisados se han realizado comparando atletas de élite con no deportistas y/o analizando los efectos agudos de una sola sesión de ejercicio, lo cual hace difícil la generalización de los resultados al resto de la población. Estas circunstancias también dificultan establecer un régimen de entrenamiento adecuado para lograr los beneficios que puede dejar el deporte en el funcionamiento cerebral.

Finalmente, en el caso de los adultos mayores, los beneficios en la función cerebral están mejor descritos, sobre todo porque casi en la totalidad de los trabajos reportados, se han realizado estudios de imagen y/o electrofisiológicos. Al igual que con los niños se observan beneficios en el desempeño de la atención, FE y memoria. Estos beneficios se reportan asociados a un aumento en el volumen de materia gris y blanca, en la corteza temporal frontal, parietal y en el hipocampo (ver tabla 3). Sin embargo, en este sector de la población también es difícil establecer un programa de entrenamiento que sea efectivo para lograr las mejoras reportadas en el FC, debido a que los participantes practicaban actividad aeróbica en distintas modalidades y periodos de tiempo (sesiones diarias de 30-60 min, 3-5 veces por semana, durante 3-12 meses).

Dadas las diferencias señaladas en cuanto a las funciones cognoscitivas beneficiadas con el ejercicio físico, es necesario estudiar un mayor número de procesos cognoscitivos en los tres rangos de edad, para determinar si se benefician las mismas funciones y si el sustrato neural involucrado, es el mismo en los tres grupos. Asimismo, se sugiere el uso de baterías neuropsicológicas amplias, con el propósito de realizar un análisis exhaustivo de los beneficios aportados por el ejercicio a la cognición y la inclusión de un mayor número de sujetos en las muestras de estudio para dar certidumbre a los resultados.

También es necesario realizar estudios en donde se contrasten distintos tipos, tiempos y frecuencias de entrenamiento, para llegar a conclusiones al respecto en cada grupo de edad. Esto permitiría precisar las características que deben cumplir los programas de entrenamiento para producir los cambios deseados.

De igual manera, falta realizar estudios longitudinales que nos permitan resolver cuestiones acerca de si los beneficios que se producen llegan a un límite, o van incrementándose si la persona persiste en un entrenamiento. Además, se debe analizar la forma en que otros factores podrían influir en los cambios cerebrales observados, como alimentación, educación, hábitos de sueño, ocupación, estado nutricional, etc.

A medida que se resuelvan estas interrogantes, será posible la creación de programas específicos, adaptados a distintas poblaciones sanas o con daño neurológico, neuropsicológico y/o psiquiátrico que permitan la implementación de programas de entrenamiento físico paralelos a los tratamientos de rehabilitación cognoscitiva.

Por otra parte, los estudios revisados que utilizaron neuroimagen revelan que existe un sustrato neuronal muy importante, asociado a los cambios benéficos en las funciones cognoscitivas. De acuerdo a los estudios con animales los cambios estructurales y funcionales observados en el cerebro, podrían deberse a la producción de factores de crecimiento y al aumento en los niveles de neurotransmisores cerebrales, que sustentarían la formación de nuevas células, el incremento de la supervivencia neuronal, la eficacia sináptica, la conectividad y plasticidad neuronal.

Conclusiones

Se puede concluir que los beneficios cerebrales relacionados con el ejercicio aeróbico se ven sustentados por la estimulación de procesos neuronales como la creación o perfeccionamiento de redes sinápticas y la supervivencia neuronal.

Esta evidencia muestra la necesidad de promover la actividad física, ya que puede ser visto no solo como una herramienta para la promoción de la salud en general, sino también para apoyar el envejecimiento exitoso y como alternativa en la rehabilitación cognoscitiva.

Finalmente, podríamos señalar que los beneficios a nivel cerebral reportados por el entrenamiento físico se dan en cualquier periodo de la vida y es accesible a personas de todas las edades y clases sociales, ya que no se requiere de una práctica prolongada (años de entrenamiento), ni grandes cantidades de ejercicio, basta con una cantidad moderada, con intensidad leve pero persistente.

Referencias

- Angevaren, M., Aufdemkampe, G., Verhaar, H. J., Aleman, A. y Vanhees, L. (2008). Physical activity and enhanced fitness to improve cognitive function in older people without known cognitive impairment. *Cochrane Database Syst Rev*, 3(3). doi: 10.1002/14651858.CD005381.pub2
- Baker, L.D., Frank, L.L., Foster-Schubert, K., Green, P.S., Wilkinson, C.W., McTiernan, A., ... Craft, S. (2010). Effects of aerobic exercise on mild cognitive impairment: a controlled trial. *Archives of neurology*, 67(1), 71-79.
- Binder, D.K. y Scharfman, H.E. (2004). Mini review. *Growth factors*, 22(3), 123-131.
- Berchicci, M., Lucci, G. y Di Russo, F. (2013). Benefits of physical exercise on the aging brain: the role of the prefrontal cortex. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 68(11), 1337-1341.
- Best, J.R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, 30(4), 331-351. doi:10.1016/j.dr.2010.08.001
- Budde, H., Voelcker-Rehage, C., Pietraßyk-Kendziorra, S., Ribeiro, P. y Tidow, G. (2008). Acute coordinative exercise improves attentional performance in adolescents. *Neuroscience letters*, 441(2), 219-223. doi:10.1016/j.neulet.2008.06.024
- Chaddock, L., Erickson, K.I., Prakash, R.S., Kim, J.S., Voss, M.W., VanPatter, M., ... Kramer, A.F. (2010a). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain research*, 1358, 172-183.

- Chaddock, L., Erickson, K.I., Prakash, R.S., VanPatter, M., Voss, M.W., Pontifex, M.B., ... Kramer, A.F. (2010b). Basal ganglia volume is associated with aerobic fitness in preadolescent children. *Developmental neuroscience*, 32(3), 249-256.
- Colcombe, S.J., Kramer, A.F., Erickson, K.I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N.J., ... Elavsky, S. (2004). Cardiovascular fitness, cortical plasticity, and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(9), 3316-3321.
- Colcombe, S., Erickson, K., Scalf, P., Kim, J., Prakash, R., ... Kramer A. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 61(11), 1166-1170.
- 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), 333-344. doi:10.1080/02640410701591417.
- Davis, C.L., Tomporowski, P.D., Boyle, C.A., Waller, J.L., Miller, P.H., Naglieri, J.A. y Gregoski, M. (2007). Effects of aerobic exercise on overweight children's cognitive functioning: a randomized controlled trial. *Research quarterly for exercise and sport*, 78(5), 510-519.
- Davis, C.L., Tomporowski, P.D., McDowell, J.E., Austin, B.P., Miller, P.H., Yanasak, N.E., ... Naglieri, J.A. (2011). Exercise improves executive function and achievement and alters brain activation in overweight children: a randomized, controlled trial. *Health Psychology*, 30(1), 91-98. doi:10.1037/a0021766.Exercise
- Del Percio, C.D., Infarinato, F., Iacoboni, M., Marzano, N., Soricelli, A., Aschieri, P., ... Babiloni, C. (2010). Movement-related desynchronization of alpha rhythms is lower in athletes than non-athletes: a high-resolution EEG study. *Clinical Neurophysiology*, 121(4), 482-491.
- Ellemborg, D. y St-Louis-Deschênes, M. (2010). The effect of acute physical exercise on cognitive function during development. *Psychology of Sport and Exercise*, 11, 122-126. doi:10.1016/j.psychsport.2009.09.006
- Erickson, K.I., Voss, M.W., Prakash, R.S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., ... Kramer, A.F. (2011). Exercise training increases size of hippocampus and improves memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 3017-3022. doi:10.1073/pnas.1015950108
- Erickson, K.I., Miller, D.L., Weinstein, A.M., Akl, S.L. y Banducci, S. (2012). Physical activity and brain plasticity in late adulthood: a conceptual and comprehensive review. *Ageing Research*, 3(1), e6.
- Erickson, K.I., Hillman, C.H. y Kramer, A.F. (2015). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*.
- Franco-Martín, M., Parra-Vidales, E., González-Palau, F., Bernate-Navarro, M. y Solis A. (2013). The influence of physical exercise in the prevention of cognitive deterioration in the elderly: a systematic review. *Revista Neurología*, 56(11), 545-54.
- Griffin, É.W., Mullally, S., Foley, C., Warmington, S.A., O'Mara, S.M. y Kelly, Á.M. (2011). Aerobic exercise improves hippocampal function and increases BDNF in the serum of young adult males. *Physiology and Behavior*, 104, 934-941. doi:10.1016/j.physbeh.2011.06.005
- Harada, T., Okagawa, S. y Kubota, K. (2004). Jogging improved performance of a behavioral branching task: implications for prefrontal activation. *Neuroscience research*, 49(3), 325-337.
- Hillman, C.H., Pontifex, M.B., Raine, L.B., Castelli, D.M., Hall, E.E. y Kramer, A.F. (2009). The effect of acute treadmill walking on cognitive control and academic achievement in preadolescent children. *Neuroscience*, 159(3), 1044-1054.
- Hyodo, K., Dan, I., Suwabe, K., Kyutoku, Y., Yamada, Y., Akahori, M., ... Soya, H. (2012). Acute moderate exercise enhances compensatory brain activation in older adults. *Neurobiology of Aging*, 33(11), 2621-2632. doi:10.1016/j.neurobiolaging.2011.12.022
- Jacini, W.F., Cannonieri, G C., Fernandes, P.T., Bonilha, L., Cendes, F. y Li, L.M. (2009). Can exercise shape your brain? Cortical differences associated with judo practice. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(6), 688-690.

- Janssen, I. (2007). Physical activity guidelines for children and youth. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(S2E), S109-121.
- Janssen, I. y LeBlanc, A. G. (2010). Review Systematic review of the health benefits of physical activity and fitness in school-aged children and youth. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 7(40), 1-16.
- Jiménez, M.G., Martínez, P., Miró, E. y Sánchez, A.I. (2008). Bienestar psicológico y hábitos saludables: ¿están asociados a la práctica de ejercicio físico? *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 8, 1, 185-202.
- Kimura, K. y Hozumi, N. (2012). Investigating the acute effect of an aerobic dance exercise program on neuro-cognitive function in the elderly. *Psychology of Sport and Exercise*, 13(5), 623-629. doi:10.1016/j.psychsport.2012.04.001
- Kramer, A.F. y Erickson, K.I. (2007). Capitalizing on cortical plasticity: influence of physical activity on cognition and brain function. *Trends in cognitive sciences*, 11(8), 342-348. doi:10.1016/j.tics.2007.06.009
- Lafenetre, P., Leske, O., Wahle, P. y Heumann, R. (2011). The beneficial effects of physical activity on impaired adult neurogenesis and cognitive performance. *Frontiers in neuroscience*, 5, 1-8. doi:10.3389/fnins.2011.00051
- Nakata, H., Yoshie, M., Miura, A. y Kudo, K. (2010). Characteristics of the athletes' brain: Evidence from neurophysiology and neuroimaging. *Brain research reviews*, 62(2), 197-211. doi:10.1016/j.brainresrev.2009.11.006
- Nielsen, J.B. y Cohen, L.G. (2008). The olympic brain. Does corticospinal plasticity play a role in acquisition of skills required for high-performance sports?. *The Journal of physiology*, 586(1), 65-70. doi:10.1113/jphysiol.2007.142661
- Nieto-Sampedro, M., (2003). Plasticidad neural. *Mente y Cerebro*, 3, 72-80.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2010). Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks. Ginebra: WHO Library.
- O'Leary, K.C., Pontifex, M.B., Scudder, M.R., Brown, M.L. y Hillman, C.H. (2011). The effects of single bouts of aerobic exercise, exergaming, and videogame play on cognitive control. *Clinical Neurophysiology*, 122(8), 1518-1525. doi:10.1016/j.clinph.2011.01.049
- Padilla, C., Pérez, L. y Andrés, P. (2014). Chronic exercise keeps working memory and inhibitory capacities fit. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 8, 49. doi:10.3389/fnbeh.2014.00049
- Pesce, C., Crova, C., Cereatti, L., Casella, R. y Bellucci, M. (2009). Physical activity and mental performance in preadolescents: Effects of acute exercise on free-recall memory. *Mental Health and Physical Activity*, 2(1), 16-22. doi:10.1016/j.mhpa.2009.02.001
- Podewils, L.J., Guallar, E., Kuller, L.H., Fried, L.P., Lopez, O.L., Carlson, M. y Lyketsos, C.G. (2005). Physical activity, APOE genotype, and dementia risk: findings from the Cardiovascular Health Cognition Study. *American journal of epidemiology*, 161(7), 639-651. doi:10.1093/aje/kwi092
- Rojas-Vega, S., Abel, T., Lindschulten, R., Hollmann, W., Bloch, W. y Strüder, H.K. (2008). Impact of exercise on neuroplasticity-related proteins in spinal cord injured humans. *Neuroscience*, 153(4), 1064-1070.
- Rooks, C.R., Thom, N.J., McCully, K.K. y Dishman, R.K. (2010). Effects of incremental exercise on cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy: a systematic review. *Progress in neurobiology*, 92(2), 134-150. doi:10.1016/j.pneurobio.2010.06.002
- Ruscheweyh, R., Willemer, C., Krüger, K., Duning, T., Warnecke, T., Sommer, J., ... Flöel, A. (2011). Physical activity and memory functions: An interventional study. *Neurobiology of aging*, 32(7), 1304-1319.
- Schneider, S., Vogt, T., Frysck, J., Guardiera, P. y Strüder, H. K. (2009). School sport-A neurophysiological approach. *Neuroscience letters*, 467(2), 131-134. doi:10.1016/j.neulet.2009.10.022.

- Smith, P. J., Blumenthal, J.A., Hoffman, B.M., Cooper, H., Strauman, T A., Welsh-Bohmer, K., ... Sherwood, A. (2010). Aerobic exercise and neurocognitive performance: a meta-analytic review of randomized controlled trials. *Psychosomatic medicine*, 72(3), 239-252.
- Stroth, S., Kubesch, S., Dieterle, K., Ruchow, M., Heim, R. y Kiefer, M. (2009). Physical fitness, but not acute exercise modulates event-related potential indices for executive control in healthy adolescents. *Brain research*, 1269, 114-124.
- Tang, S. W., Chu, E., Hui, T., Helmeste, D. y Law, C. (2008). Influence of exercise on serum brain-derived neurotrophic factor concentrations in healthy human subjects. *Neuroscience letters*, 431(1), 62-65. doi:10.1016/j.neulet.2007.11.019
- Tomprowski, P.D., Davis, C.L., Miller, P.H. y Naglieri, J.A. (2008). Exercise and children's intelligence, cognition, and academic achievement. *Educational Psychology Review*, 20(2), 111-131.
- Torres, M.G.J., de Vaca, P.M.N.C., Morales, E.M. y Sánchez, A.I. (2008). Bienestar psicológico y hábitos saludables: ¿están asociados a la práctica de ejercicio físico?. *International Journal of Clinical and Health Psychology*, 8(1), 185-202.
- Tseng, C.N., Gau, B.S. y Lou, M.F. (2011). The effectiveness of exercise on improving cognitive function in older people: a systematic review. *Journal of Nursing Research*, 19(2), 119-131.
- Vicente-Rodríguez, G., Ara, I., Pérez-Gómez, J., Dorado, C., Serrano-Sánchez, J.A. y Calbet, J.A.L. (2010). Interacción de los tejidos blandos sobre la salud del esqueleto durante el crecimiento: influencia de la actividad física. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 16, 1-18.
- Voss, M. , Prakash, R.S., Erickson, K.I., Basak, C., Chaddock, L., Kim, J.S., ... Kramer, A.F. (2010). Plasticity of brain networks in a randomized intervention trial of exercise training in older adults. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2(August), 1-17. doi:10.3389/fnagi.2010.00032
- Wei, G. y Luo, J. (2010). Sport expert's motor imagery: Functional imaging of professional motor skills and simple motor skills. *Brain research*, 1341, 52-62.
- Wipfli, B., Landers, D., Nagoshi, C. y Ringenbach, S. (2011). An examination of serotonin and psychological variables in the relationship between exercise and mental health. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(3), 474-481.
- Yarrow, K., Brown, P. y Krakauer, J.W., (2009). Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nature Reviews Neuroscience*. 10: 585-596
- Yanagisawa, H., Dan, I., Tsuzuki, D., Kato, M., Okamoto, M., Kyutoku, Y. y Soya, H. (2010). Acute moderate exercise elicits increased dorsolateral prefrontal activation and improves cognitive performance with Stroop test. *Neuroimage*, 50(4), 1702-1710. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.12.023