

El estado cardiorrespiratorio en el envejecimiento: relación con la función cerebral y la ejecución en tareas de atención visual

Autor: Dorado Nogueiras, Laura (Psicóloga. Especialidad en Psicogerontología).

Público: Psicólogos/as. **Materia:** Psicobiología y Neurociencia Cognitiva. **Idioma:** Español.

Título: El estado cardiorrespiratorio en el envejecimiento: relación con la función cerebral y la ejecución en tareas de atención visual.

Resumen

Se realiza una revisión de la influencia del estado cardiorrespiratorio en el proceso de envejecimiento poniéndolo en relación con la función cerebral y cognitiva, concretamente, con la ejecución en tareas que implican atención visual. Los estudios concuerdan en que el estado cardiorrespiratorio puede ofrecer una amortiguación protectora contra los declives cognitivos asociados al envejecimiento. Algunos factores que pueden afectar a esa relación son: el grado de dificultad de una tarea de atención visual, la conductancia cerebrovascular, la presión arterial o la enfermedad cardíaca. Se trata de un campo de investigación poco explorado que abre líneas de estudio para el futuro.

Palabras clave: Estado cardiorrespiratorio, envejecimiento, atención visual, función cerebral.

Title: Cardiorespiratory fitness in aging: brain function and visual attention task performance.

Abstract

A review of the influence of cardiorespiratory fitness in aging process. This factor is related with brain and cognitive function and, specifically, with the execution in visual attention tasks. Studies show that cardiorespiratory fitness may be a protective factor in cognitive decline associated with aging, as for instance, age-related decline in myelin integrity in the corpus callosum. Factors that may be affecting this relationship were detected: degree of difficulty in visual attention tasks, cerebrovascular conductance, average arterial pressure or cardiac disease. It is a field of research unexplored but also opens study lines that may be completed in the future.

Keywords: Cardiorespiratory fitness, aging, visual attention, brain function.

Recibido 2017-06-26; Aceptado 2017-07-05; Publicado 2017-07-25; Código PD: 085074

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de revisión bibliográfica se centra en la investigación existente acerca de la relación entre el estado cardiorrespiratorio, la función cerebral y la ejecución en tareas de atención visual en el envejecimiento.

Se trata de un tema de una gran importancia debido al aumento de la esperanza de vida y los desequilibrios demográficos que hacen prever para los próximos años un perfil de sociedad envejecida a nivel nacional, pero todavía más importante en la comunidad gallega (Instituto Nacional de Estadística, 2013).

El envejecimiento es el proceso de maduración humano, tanto en sus estructuras como en sus funciones, de carácter continuo y cíclico, y eminentemente personal. En él interrelacionan variables físicas, químicas y biológicas por un lado, con otras de carácter psicológico, cultural y social.

Las características del proceso se ven afectadas por las transformaciones que se producen en el medio social humano. Es el caso los cambios ecológicos, sociales, económicos, sanitarios, biológicos y psicológicos que ocurren en las sociedades, como son la industrialización de las actividades humanas y su tecnificación progresiva, la intensa urbanización de las poblaciones, el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, los niveles de vida y las desigualdades sociales y económicas.

El envejecimiento de las sociedades es uno de los principales retos demográficos de este siglo ya que las poblaciones están viendo como sus habitantes viven más años de una forma saludable y productiva. Se trata de una situación novedosa puesto que hasta el momento no se habían reunido las características necesarias para llegar a este punto: la

disminución del número de hijos por mujer al bajar el nivel de reemplazo, nuevas y mejores tecnologías que favorecen un mejor nivel de vida, avances médicos que evitan la muerte temprana, nuevos productos farmacéuticos que palián en algunos casos diversos efectos adversos del envejecimiento, el descubrimiento del mapa del genoma humano con lo que se disminuye el riesgo de padecer enfermedades, anomalías, etc. (Cardona Arango & Peláez, 2012).

El envejecimiento, por tanto, se puede considerar una característica definitoria de la población actual y, en función de ello, la investigación para conocer las formas en las que se puede mejorar la calidad de vida de las personas en las últimas etapas del ciclo vital es de gran importancia.

Más concretamente, y desde el ámbito de la Psicobiología y la Neurociencia Cognitiva, interesa ahondar en las relaciones existentes entre la función cerebral y las funciones cognitivas, y cómo otros factores del organismo pueden afectar a esas relaciones, para crear una base de conocimiento que permita mejorar tanto como sea posible las capacidades neurocognitivas en las personas mayores. Además, si en este contexto, se demuestra el efecto protector de un elemento, en este caso un estado saludable a nivel cardiorrespiratorio, se puede emplear a nivel preventivo para ralentizar el deterioro normal que conlleva la edad.

Por tanto, todo un campo de estudio, e intervención, de gran interés y repercusión se centra en los estudios empíricos que se realizan en torno a las relaciones entre el estado de salud cardiorrespiratoria, la función cerebral y la función cognitiva en la población mayor.

1. ENVEJECIMIENTO

El envejecimiento es un proceso natural, propio del ciclo vital, que trae consigo el declive de determinados procesos cognitivos. Estos se vuelven menos eficientes y, en función de ello, la ejecución de una gran variedad de tareas cognitivas también se ve afectada. Todo ello tiene su manifestación a nivel morfológico con una disminución del peso y volumen cerebral, una pérdida de mielina y una disminución del volumen de sustancia blanca y de sustancia gris que implica la dilatación de los ventrículos y de los surcos corticales (Terry, De Teresa & Hansen, 1987; en Valero Herreros, 2011). Además se ha demostrado que el proceso de atrofia no es uniforme, sino que afecta con más intensidad a las áreas prefrontales, en áreas del giro fusiforme del córtex temporal inferior y del parietal superior (Raz, Gunning-Dixon, Head, Rodrigue, Williamson & Acker, 2004). Otro aspecto relevante se relaciona con los cambios intracelulares y la reducción del flujo sanguíneo cerebral, que también compromete la eficiencia metabólica del cerebro. Frente a estos cambios en el funcionamiento cognitivo producidos por el envejecimiento normal, se encuentran aquellos que forman parte de un proceso patológico. Bajo esta diferenciación, el deterioro cognitivo es entendido como el punto intermedio entre la normalidad cognitiva y la pérdida completa de las funciones intelectuales, algo propio de las fases avanzadas de las demencias. Mientras que el declive cognitivo gradual no constituye enfermedad, el deterioro cognitivo implica varias funciones cognitivas en un grado superior al esperado para la edad, el nivel de salud general y el nivel cultural del sujeto.

En lo que respecta a la capacidad atencional, el deterioro normal con la edad conlleva una peor ejecución en tareas de atención sostenida y sobre todo en tareas de atención selectiva (Hartley, 1992; en Lorenzo-López, 2007). Precisamente los problemas de atención selectiva están entre los más característicos en síndromes como la demencia y son aquellos que tienen una mayor repercusión en tareas que requieren procesamiento simultáneo de información procedente de diversas fuentes.

El interés por estudiar los efectos del envejecimiento sobre los procesos de atención selectiva surge con los trabajos de Rabbitt (1965), quien utilizando una tarea de clasificación de tarjetas observó que con el incremento de la dificultad, los sujetos de más edad tardaban más tiempo en responder. Existe una evidencia consistente basada en estudios de neuroimagen que relacionan la edad y el declive de la atención selectiva (Madden, Whiting & Huettel, 2005). Estos trabajos sugieren que las personas mayores tienen menor capacidad que los jóvenes para focalizar selectivamente la atención en el estímulo relevante. Lorenzo-López, Amenedo & Cadaveira (2008) encontraron que las personas mayores son más lentas y menos eficaces que los jóvenes en tareas que impliquen búsqueda visual, lo que se interpreta como un declive en la habilidad para inhibir la información irrelevante (Colcombe et al., 2003).

Lorenzo-López (2007) hace un repaso de las diversas teorías que han surgido para dar explicación al deterioro atencional observado en el envejecimiento. Desde la perspectiva del procesamiento de la información se defiende la *teoría de velocidad de procesamiento* que postula que los cambios cognitivo-conductuales observados en las personas mayores provienen de un descenso generalizado y gradual en la velocidad de procesamiento mental, es decir, un entecimiento cognitivo. Así, como consecuencia de una codificación menos efectiva, se ven afectados todos los

procesos cognitivos, y entre ellos la atención. El proceso de enlentecimiento cognitivo implica la disminución de la cantidad de neuronas y la desmielinización de las mismas, así como una reducción de los receptores dopaminérgicos cerebrales. Todo esto conlleva que se emplee gran parte del tiempo disponible en la ejecución de operaciones iniciales de las tareas de atención, quedando las últimas afectadas y empobrecidas.

Desde otra perspectiva se ha centrado el declive cognitivo observado en ancianos en los *déficits en los mecanismos de control ejecutivo*, entre ellos el control inhibitorio. Para una ejecución correcta es necesario inhibir la información irrelevante, y se ha asociado el envejecimiento con una alteración progresiva en la capacidad de ignorar dichos estímulos, afectando a la capacidad para focalizar la atención selectiva (Lustig, Hasher & Tonev, 2001).

Por último, algunos investigadores han explicado las dificultades de los mayores en tareas de atención y búsqueda visual en función de factores ópticos que afectan a la visión periférica. Se ha observado una relación entre la edad del sujeto y la restricción en el tamaño del campo visual funcional, esto es, el área total en la que la información puede ser procesada eficientemente sin movimientos de cabeza ni fijaciones oculares. Además se ha comprobado que esta restricción puede ser parcialmente recuperada con el entrenamiento (Madden et al., 2005).

2. ATENCIÓN VISUAL

A través del sistema visual recibimos la mayor parte de información para interpretar el espacio extrapersonal, lo que tiene una gran importancia para la adaptación al medio. Dado que el ser humano posee un procesamiento limitado, se hace imprescindible la capacidad de desplazar el foco de atención visual hacia las localizaciones donde se encuentran los estímulos relevantes. La capacidad cognitiva de priorizar el procesamiento de una unidad de información sobre otra es lo que se ha denominado atención selectiva o focal (Madden, 1990). Esta capacidad incluye los procesos de detección preferencial, identificación y reconocimiento de los estímulos relevantes del entorno.

Castillo Moreno & Paternina Marín (2006) ofrecen una revisión de la evolución del concepto de atención desde que comenzó el interés por estudiar la cuestión. James define la atención como *la toma de posesión por parte de la mente, de uno entre los muchos simultáneamente posibles objetos o series de pensamiento*, haciendo énfasis en la función selectiva del proceso (en James, 1989). En los años 50 y 60 la atención era entendida como un proceso facilitatorio: algún mecanismo cerebral seleccionaba los estímulos relevantes y la atención facilitaba su procesamiento posterior. De esta forma se pensaba en canales de capacidad limitada, donde sólo se podía procesar un número limitado de estímulos. A modo de “cuello de botella”, la información pasaba por un filtro donde era procesada a niveles profundos. Surgieron estudios que querían demostrar la serialidad en la identificación de estímulos, frente a los que consideraban que el filtro atencional se encontraba en estadios de procesamiento posteriores. El énfasis de los modelos de filtro se centra en la función selectiva de la atención, asumiendo que la capacidad del sistema es limitada.

Posteriormente se desarrollaron teorías que postulaban un segundo proceso que facilitaría la tarea de selección: la activación reducida de forma activa por parte de los distractores. Esto permite discriminar estímulos objetivos de distractores e incrementar la velocidad al seleccionar los objetivos de entre todos los estímulos que llegan al sistema perceptivo (ver Castillo Moreno & Paternina Marín, 2006). Los estudios experimentales que más han aportado en la demostración de la existencia de un mecanismo inhibitorio han empleado principalmente tareas de tipo Stroop y *priming* negativo. Cuando el sujeto debía responder a un color que era el mismo que designaba la palabra del ensayo anterior, la respuesta era más lenta, lo que parecía indicar la existencia de un mecanismo de inhibición del significado de las palabras.

Con estas aportaciones se reconceptualizó la atención, pasando a ser considerada un proceso complejo y flexible, que se adapta a las necesidades y exigencias de la tarea. Se pasó de la metáfora del “filtro” a la del “foco atencional”. La idea que defiende es la existencia de un mecanismo que facilita los estímulos objetivos de una región del mapa perceptivo y permite ignorar los distractores fuera de dicha región. Las propiedades y funcionamiento del foco atencional han sido aspectos muy estudiados en los últimos años. Se ha investigado la forma del foco, el tamaño, si puede ser dividido y otras cuestiones (Eriksen & Yeh, 1985).

A la hora de hablar de la atención selectiva es necesario diferenciar dos procesos de desplazamiento atencional distintos. El primero, en el que la atención se desplaza rápida y automáticamente hacia una localización del campo visual ante un estímulo saliente. Se trata un proceso involuntario hacia estímulos que inicialmente no despertaban interés, pero que atraen la atención por su carácter saliente y se ha denominado mecanismo de selección *bottom-up* o de captura atencional (Ruz & Lupiáñez, 2002). Por otra parte, la atención puede desplazarse de forma voluntaria hacia estímulos que despierten el interés de manera consciente. Las localizaciones o características seleccionadas dependen en este caso de

las motivaciones e intenciones del propio sujeto. Este proceso atencional, dirigido por niveles superiores del sistema nervioso central, lleva el nombre de mecanismo de selección *top-down*, requiere un mayor esfuerzo por parte del sujeto y presenta un curso temporal más lento y sostenido.

A pesar de que se trata de dos procesos bien diferenciados, bajo algunas circunstancias se han demostrado interacciones importantes entre ambos. Tal es el caso de las tareas de búsqueda visual en las cuales la aparición repentina de un estímulo nuevo en la escena visual puede desplazar la atención automáticamente hacia su localización, incluso cuando ese estímulo no funciona como objetivo y por tanto no se incluye en el repertorio que suscita el interés del sujeto (Remington, Johnson & Yantis, 1992; ver, sin embargo, Lorenzo-López et al., 2008).

Actualmente el modelo propuesto por Posner está considerado como el más sólido y el que más apoyo experimental ha recibido para explicar las bases neurales de la atención visual selectiva. Esta teoría mantiene que existen tres sistemas cerebrales interrelacionados, cuya función integral es la de regular los diferentes componentes de la atención (Posner & Raichle, 1994, en Lorenzo-López, 2007). En primer lugar se encuentra el sistema atencional de alerta o *arousal*, que tiene la capacidad de aumentar y mantener la preparación para la respuesta ante un estímulo inminente. Depende del sistema reticular mesencefálico y de sus conexiones talámicas, límbicas, frontales y de los ganglios basales. El segundo sistema es el de atención posterior, de selectividad perceptiva o sistema de orientación. Sustenta la capacidad de seleccionar información específica entre una multitud de estímulos sensoriales. Según este sistema la captura de la atención es controlada por el núcleo pulvinar lateral, que selecciona los estímulos relevantes y bloquea los irrelevantes; los colículos superiores controlarían el desplazamiento de la atención de una localización del campo visual a otra, y el córtex parietal posterior, con predominio hemisférico derecho se encargaría de la refocalización hacia la localización de interés (Corbetta, Kincade, Ollinger, McAvoy & Shulman, 2000). El último de los sistemas es el atencional anterior, sistema supervisor o de control ejecutivo, que monitoriza y resuelve conflictos que se producen en distintas áreas cerebrales para priorizar los que se dirigen a la meta que se quiere alcanzar. Este sistema estaría integrado por el córtex cingulado anterior, las áreas prefrontales dorsolaterales y orbitofrontales y el núcleo caudado del neostriado, así como otras estructuras dopaminérgicas. La existencia de una red de sistemas anatómicos y funcionales que participan y controlan los procesos de atención visual selectiva ha sido demostrada mediante la investigación de los mecanismos neurales a través de técnicas psicofisiológicas y de neuroimagen funcional, como son el registro de Potenciales Evocados (PE), la Tomografía por Emisión de Positrones (TEP), o la Resonancia Magnética funcional (RMf).

En este contexto de estudio de la atención selectiva, la investigación neurocientífica sobre las bases neurales implicadas en estos procesos ha ido más allá de la descripción de las áreas que plantean los modelos de atención selectiva (ver párrafo anterior). Así, utilizando diferentes métodos psicobiológicos, como los registros de actividad unicelular en primates no humanos, o las técnicas de neuroimagen funcional, la de potenciales evocados (derivada de la actividad electroencefalográfica, EEG) y la magnetoencefalografía (MEG) en el ser humano, se ha demostrado la implicación de las áreas occipitales, temporales, parietales y frontales en tareas de búsqueda visual (consideradas como más próximas a las situaciones reales de atención). Más concretamente, cabe destacar el papel que desempeñan las áreas visuales occipitales (V1, V2, V4), las áreas visuales temporales (córtex inferotemporal y temporooccipital), el córtex parietal posterior, los campos oculares frontales, el córtex prefrontal lateral y el córtex cingulado (Hopf et al., 2000; Lorenzo-López, Gutiérrez, Moratti, Maestú, Cadaveira, & Amenedo, 2011).

En un primer momento, la búsqueda visual requiere la percepción y procesamiento de los estímulos, lo que requiere del córtex visual occipital. La información captada pasa a la corteza visual primaria (V1) a través del núcleo geniculado lateral del tálamo y desde allí se establecen interconexiones con los dos circuitos de procesamiento visual (Haxby et al., 1991; McIntosh et al., 1994). El primero recibe el nombre de inferior, occipitotemporal o vía visual ventral y se distribuye en las áreas V1, V2 y V4 terminando en las áreas visuales del córtex temporal inferior (IT y TEO). También mantiene interconexiones con el córtex prefrontal dorsolateral. Esta vía está implicada en el reconocimiento visoperceptivo de los objetos y en la identificación de las características visuales básicas (color y forma). Mientras que la primera es conocida como la vía del *qué*, la segunda lo es como la vía del *dónde*. Este segundo circuito es el llamado superior, occipito-parieto-frontal o vía dorsal y se distribuye en las áreas V1, V2, V3, V5 (MT) y córtex temporal medial superior (del inglés *Medial Superior Temporal cortex*, MST). También mantiene interconexiones con el córtex parietal posterior y con el córtex prefrontal dorsolateral. Esta vía está implicada en el reconocimiento visoespacial (localización y movimiento) y en la ejecución visomotora. Ambas vías comparten la característica de presentar una organización jerarquizada, que va desde el análisis más simple de las características visuales, llevado a cabo por las áreas corticales posteriores de bajo nivel, al análisis más complejo efectuado por las regiones de alto nivel como las cortezas de asociación.

Tabla 1. Circuitos de procesamiento visual.

	VÍA VISUAL VENTRAL	VÍA VISUAL DORSAL
Otros nombres	Vía inferior, occipitotemporal o vía del <i>qué</i> .	Vía superior, occipito-parieto-frontal o vía del <i>dónde</i> .
Áreas implicadas	V1, V2, V4 y áreas visuales del córtex temporal inferior (IT y TEO).	V1, V2, V3, V5 (MT) y córtex temporal medial superior (MST).
Interconexiones	Con el córtex prefrontal dorsolateral.	Con el córtex parietal posterior y con el córtex prefrontal dorsolateral.
Implicación	Reconocimiento visoperceptivo de objetos e identificación de características visuales básicas (color y forma).	Reconocimiento visoespacial (localización y movimiento) y ejecución visomotora.
Organización	Jerarquizada: del análisis simple de las características visuales (V1, V2) al complejo (cortezas de asociación).	

3. ESTADO CARDIORRESPIRATORIO

El cerebro es un órgano único por el hecho de que las neuronas tienen un metabolismo casi exclusivamente aeróbico, es por eso que dependen de un aporte sanguíneo constante. Esto significa que la producción de energía, tanto para mantener la estructura como la función neuronal, necesita del oxígeno y la glucosa que llega a las neuronas por la sangre arterial. Si el cerebro es privado de sangre, se pierde la conciencia en segundos y se produce daño permanente en minutos. Quizás es debido a la vulnerabilidad única del cerebro que la evolución le suministró un aporte sanguíneo abundante y anatómicamente diverso. El cerebro recibe un excedente del gasto cardíaco, asegurando las cantidades de glucosa y oxígeno mínimas. De todo ello se evidencia que un buen estado cardiorrespiratorio y cardiovascular traerá consigo una mejor perfusión sanguínea cerebral, lo que permitirá que el cerebro esté bien nutrido para llevar a cabo las tareas oportunas.

Cada vez más estudios evalúan la relación entre la condición física y la salud del cerebro mediante el estado cardiorrespiratorio (ECR), que hace referencia a cómo trabaja el sistema cardiovascular en el transporte y uso del oxígeno en el cuerpo. Esto conductualmente se traduce en la habilidad de ejecutar actividad física, de intensidad de moderada a alta, durante un período prolongado de tiempo. Es por ello que este estado depende de la integridad de los sistemas cardiovascular, respiratorio y musculo-esquelético (Hayes, Hayes, Cadden & Verfaellie, 2013).

El origen de los estudios de neuroimagen y estado cardiorrespiratorio en humanos se atribuye, por un lado, al trabajo que relacionaba el buen estado cardiorrespiratorio con una mejora del ejercicio en rueda de correr por parte de roedores con sobrerregulación de neurotrofinas, la plasticidad neurovascular y la neurogénesis, y por otra parte los estudios con humanos que relacionaban el entrenamiento aeróbico con una mejora cognitiva (por ejemplo, Churchill et al., 2002).

El estado cardiorrespiratorio puede ser evaluado de diferentes formas (ver Hayes et al., 2013). La primera de ellas es mediante las medidas de utilización de oxígeno durante una prueba de esfuerzo en cinta de correr que proporcionan un índice directo de la capacidad cardiorrespiratoria. En tales pruebas se registran: la velocidad de la cinta y su incremento, el aumento del grado de inclinación de la cinta, en intervalos de 1-2 min, así como el volumen del consumo de oxígeno de los participantes (medida VO_2). Las dos medidas más relevantes son:

- El VO_2 Pico (el valor más elevado del volumen de oxígeno alcanzado en la prueba de esfuerzo).
- El VO_2 Max (el valor del volumen de oxígeno constante o mínimamente incrementado durante un período de tiempo en el que aumenta la carga de trabajo en la prueba de esfuerzo).

Otra de las formas de medir el estado cardiorrespiratorio es utilizando los protocolos en cicloergómetros, aunque los valores de VO_2 Pico tienden a estar entre un 10 y un 20% por debajo de los obtenidos utilizando un protocolo de cinta de correr. A falta de un test homologado de VO_2 , en cinta de correr o en cicloergómetro, algunos estudios de neuroimagen han implementado estimaciones sub-máximas de VO_2 mediante el test de caminata de una milla de Rockport o han estimado el estado cardiorrespiratorio basándose en ecuaciones que usan variables como la edad y el índice de masa corporal, información fácilmente disponible.

En ausencia de medidas directas del estado cardiorrespiratorio, pueden emplearse cuestionarios de actividad física, que recogen la actividad realizada durante un período de tiempo (por ejemplo, ¿qué distancia has caminado hace 6 días?). El uso de estos cuestionarios se basa en la suposición de que los sujetos que informan de mayor cantidad de actividad física, es probable que tengan un mejor estado físico (aunque es importante tener en cuenta variables como la genética y la nutrición que también pueden afectar a dicho estado). El método de los cuestionarios cuenta con el inconveniente de estar sujeto a dar respuestas erróneas, bien sea por falta de precisión, omisiones y prejuicios, o bien por la falta de comprensión de las preguntas, algo frecuente en el caso de adultos mayores con deterioro de la memoria relacionado con la edad y las personas con demencia tipo Alzheimer.

En la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías, como los acelerómetros, ha permitido estimar el gasto de energía en base a la medición de los movimientos y magnitudes vectoriales en tres direcciones, y proporcionar una medida objetiva de la actividad física de manera independiente a la proporcionada por el autoinforme, pero este enfoque tiene que aplicarse todavía en los estudios de neuroimagen con los adultos mayores.

Sin embargo, existe evidencia de correlaciones moderadas entre los resultados de los cuestionarios de actividad física basados en autoinformes subjetivos y los valores objetivos de VO_2 Max basados en la prueba de esfuerzo gradual en cinta de correr (Bowles, Fitzgerald, Morrow, Jackson & Blair, 2004). Además, se han obtenido efectos similares en el estado cardiorrespiratorio así como en las medidas cognitivas y neuronales de los adultos mayores, sin importar el método de evaluación de la condición (McAuley et al., 2011).

METODOLOGÍA

La presente revisión bibliográfica considera aquellos estudios que ponen en relación el estado cardiorrespiratorio con el envejecimiento, la función cerebral y la ejecución en tareas de atención visual. Para ello se realizaron varias búsquedas bibliográficas siguiendo una pauta que fue de lo más general a lo más específico en lo referente a las palabras clave y período de años revisado.

En un primer momento se realizó una búsqueda inicial para tener una aproximación del volumen de información publicada sobre el tema. Se empleó la base de datos Psycinfo, usando la combinación de los descriptores: “age”, “aging”, “attention”, “selective attention”, “fitness”, “cardiorespiratory fitness”, “physical activity”, “exercise”, “brain” y “cognitive function”, así como sus variantes en español. Al comprobar la ausencia de literatura centrada en el tema en castellano, la búsqueda se centró en los artículos científicos escritos en inglés. De este primer cribado se extrajo la publicación de Hayes et al. (2013), que al tratarse de una revisión sobre el tema y por su recencia temporal permitió un primer acercamiento a la materia.

Posteriormente se realizaría la búsqueda sistemática, ampliando las bases de datos, acotando el rango de publicación de los estudios a los 10 últimos años y teniendo en cuenta la relevancia de los autores y el número de citas como criterios de inclusión. En esta ocasión se revisaron el catálogo Iacobus y el repositorio Minerva para buscar lo que se había investigado en la USC sobre el tema; Teseo, para acceder a las tesis hechas en España; y ya en cuanto a bases de datos que contienen revistas científicas se accedió a Dialnet, de nuevo Psycinfo, Google académico, Pubmed (Medline) y Science direct.

A pesar de ser un tema del que no existe una gran cantidad de investigación, se seleccionaron estudios recientes que permiten una aproximación a los hallazgos encontrados y abren posibles líneas de investigación para el futuro.

Por último, y partiendo de los trabajos seleccionados de la búsqueda bibliográfica, se han ido revisando a su vez algunas referencias contenidas en los propios artículos encontrados para localizar estudios adicionales que, aun siendo anteriores al período acotado para la búsqueda inicial, permitieran complementar la información sobre el tema de la revisión.

RESULTADOS

A continuación se sintetizan las ideas principales de los artículos trabajados para esta revisión bibliográfica. La extracción de los aspectos esenciales de cada trabajo revisado se realiza siguiendo una doble organización: en función de si se trata de un trabajo experimental o de revisión, y siguiendo un orden cronológico que va del más antiguo al más reciente (ver Tabla 2).

Tabla 2. Estudios experimentales y de revisión que ponen en relación el estado cardiorrespiratorio con la función cerebral y la ejecución de tareas de atención visual en el envejecimiento.

AÑO	AUTORES	REFERENCIA (Revista, volumen, páginas)	OBJETIVO	MÉTODOS			RESULTADOS	CONCLUSIONES
				N	Tarea/s	Técnica		
2006	Newson & Kemps	<i>Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology</i> , 28:6, 949-967	ECR (estado cardiorrespiratorio) como predictor del envejecimiento cognitivo y su influencia en los recursos de procesamiento.	100	Modelo de Jackson et al. (1990) Test de los procesos (ver texto)	VO ₂ Max Exactitud en las respuestas a los test Marcadores biológicos	Envejecimiento biológico mediador del envejecimiento cognitivo. ECR: predictor de la cognición y del envejecimiento cognitivo. Mayor implicación del ECR en los componentes de atención, memoria de trabajo y velocidad de procesamiento.	ECR puede ofrecer una amortiguación protectora contra los declives cognitivos asociados al envejecimiento.
2009	Pontifex, Hillman & Polich.	<i>Psychophysiology</i> , 46, 379-387	Relación estado de salud con cambio general del sistema atencional o con aspectos específicos de la atención.	48	Tarea <i>oddball</i> (2 y 3 Estímulos) Protocolo de Balke	Tiempo de reacción (TR) y exactitud en las respuestas VO ₂ Max PE (P3a-P3b)	En condición dos estímulos: buen estado de salud conlleva TR menores y mayor amplitud de P3b. En condición tres estímulos: jóvenes buen estado de salud conlleva mayor amplitud P3b. El estado de salud no influye en P3a (orientación atencional).	Asociación entre estado de salud y cognición mediada por edad y dificultad de la tarea.

2010	Brown et al.	<i>Neurobiology of Aging</i> , 31, 2047-2057	Ser físicamente activo está asociado con mejor retención de la función cognitiva y reserva cerebrovascular.	42	Prueba de ejercicio sub-máximo en cicloergómetro	Doppler trans-craneal	Asociación estado de salud y cognición. Los beneficios del estado de salud en la cognición mediados macrovascularmente. Incremento de la Conductancia Cerebrovascular (CVC) con el estado de salud Estado de salud protege el sistema vascular. CVC y Presión Arterial (PA): predictores significativos del funcionamiento cognitivo.	La salud aeróbica mantiene el funcionamiento saludable del cerebro en el envejecimiento.
2011	Prakash et al.	<i>Frontiers in Human Neuroscience</i> , 4, 1-12	Relación ECR y reclutamiento de las regiones de procesamiento anterior y posterior durante la tarea Stroop.	70	Versión de Stroop Test de Rockport	TR y respuestas correctas en la tarea VO ₂ iRMf	Buen ECR: TR menor en condición más desafiante. Más tasa de error en la condición <i>incongruente-elegible</i> . Inhabilidad de los adultos mayores para aumentar recursos en respuesta a la condición más demandante. ECR asociado con reclutamiento del CPF y parietal. Mayor activación en CSA frente a WSA en todas las condiciones. ECR no asociado con la activación en CSA ni WSA.	Influencia profiláctica del ECR en la cognición.

						Ausencia de relación ECR y reclutamiento de las áreas visuales ventrales.	
2012	Johnson, Kim, Clasey, Bailey & Gold	<i>NeuroImage</i> , 59, 1514-1523	Explorar relaciones entre VO ₂ Pico y Anisotropía Fraccional (AF) en la materia blanca del cerebro y las relaciones con Difusividad Media (DM), Radial (DR) y Axial (DA).	26	Prueba de ejercicio físico máximo gradual en cinta de correr.	DTI (MRI) Correlación positiva entre AF y VO ₂ Pico en una gran porción del cuerpo caloso. Correlación negativa entre VO ₂ Pico y DR (ausencia de relación con MD y DA). Fibras del cuerpo caloso interconectan regiones del córtex prefrontal homólogas que involucran la planificación motora.	El ECR puede atenuar los declives asociados a la edad en la integridad de la mielina del cuerpo caloso.
2013	Chokron, Helft & Perez.	<i>Cardiovascular Psychiatry and Neurology</i> , 2013, 1-7	Efecto del envejecimiento y la enfermedad vascular en la atención selectiva y la especialización hemisférica.	53	<i>Flankers</i>	Registro TR y detecciones correctas TR menores para todos los grupos en la condición de <i>targets</i> grandes y aislados. Confirmación de la especialización hemisférica para adultos jóvenes (RH). Confirmación de hipótesis: cambio en la especialización hemisférica con la edad. Efecto de la enfermedad cardíaca en TR.	Efecto de la historia cardíaca y del envejecimiento sobre la atención selectiva y la especialización hemisférica.
2004	McAuley, Kramer & Colcombe	<i>Brain, Behavior and Immunity</i> , 18, 214-220	Revisión de la relación entre estado cardiovascular y cerebro y cognición.	--	--	Revisión de estudios sobre la influencia del entrenamiento del estado cardiovascular Efecto significativo del entrenamiento de fitness aeróbico en la función cognitiva. La combinación de entrenamiento de fuerza y cardiovascular	Efectos beneficiosos del entrenamiento del estado cardiovascular para la cognición, el cerebro en adultos mayores.

cular en el cerebro y la cognición. presenta mejores efectos para la morfología del cerebro y la función cortical.

La adherencia al entrenamiento determina sus efectos.

2013	Hayes et al. <i>Frontiers in Human Neuroscience</i> , 5, 1-16	Revisión de la evidencia en humanos de la asociación positiva entre el ECR y la estructura y función cerebral.	--	--	Revisión de estudios sobre la relación entre ECR y estructura y función cerebral.	Consistencia en la relación del ECR con el córtex anterior cingulado, el córtex prefrontal medial y lateral y región parietal lateral. Relación inconsistente entre el ECR y MTL. Los efectos más fuertes del ECR en cognición humana son vistos en tareas dependientes de las regiones fronto-parietales, relacionados con las funciones ejecutivas de orden superior.	El ejercicio puede suscitar mejoras en el funcionamiento y neuroplasticidad en el envejecimiento cerebral. El ECR está asociado con un mayor volumen cerebral en pacientes con Alzheimer.
------	---	--	----	----	---	---	--

1. ESTUDIOS EXPERIMENTALES

1.1. Newson & Kemps (2006) buscaron determinar si el estado cardiorrespiratorio es un predictor significativo del envejecimiento cognitivo y si esta influencia es diferente para los componentes de procesamiento cognitivo de forma separada o en su conjunto. El estudio también se interesó por saber si esta relación estaba controlada por variables y biomarcadores del envejecimiento. Participaron 100 sujetos divididos en cuatro rangos de edad (25 participantes por rango): de 18 a 26 años, de 65 a 74, de 75 a 84 y de 85 a 92. En primer lugar realizaron la tarea *Clox*¹⁷⁹ para discriminar casos de demencia y también se obtuvieron mediciones del nivel educativo y del bienestar físico y psicológico. Para contar con una medida del estado cardiorrespiratorio se empleó un modelo desarrollado por Jackson, Blair, Mahar, Wier, Ross & Stuteville (1990), que no incluye como variable el ejercicio para estimar el VO₂ Max Este modelo predictivo utiliza una fórmula derivada de la edad, el género, el índice de masa corporal y la clasificación del nivel de actividad física habitual de la persona.

¹⁷⁹ La tarea Clox (Royall, Cordes & Polk, 1998), o de dibujo del reloj, se utiliza en el diagnóstico de demencia al implicar la organización de secuencias motoras y de planificación. Consiste en dibujar un reloj con los números y manecillas e indicar en él una hora. En caso de dificultad en el dibujo espontáneo, se solicita que copie el dibujo de un reloj.

Como medidas de atención selectiva se emplearon el test de Stroop (Stroop, 1935) y el test de Búsqueda en Mapa (Robertson, Ward, Ridgeway & Nimmo-Smith, 1994). Para medir memoria de trabajo se usaron el subtest de Ordenación de Letras y Números del WAIS-III (Wechsler, 1997) y la tarea de Cubos de Corsi (Milner, 1971). En cuanto a la velocidad de procesamiento se emplearon el Test de Sustitución de Dígitos por Símbolos, subtest del WAIS-III, y el Test de las Cajas (Earles & Salthouse, 1995). La función ejecutiva se midió con el Test del Mapa del Zoo y el Test de los Seis Elementos, ambos subtests de la Batería de Medida Conductual del Síndrome Disejecutivo (Wilson, Alderman, Burgess, Emslie & Evans, 1996). La medición de memoria se obtuvo mediante los subtests de *the Doors and People Test: The People Test and the Names Test* (Baddeley, Emslie & Nimmo-Smith, 1994). Por último, el envejecimiento biológico fue examinado con marcadores biológicos del envejecimiento de las funciones de audición, visión, fuerza de agarre, presión sistólica de la sangre y volumen espiratorio forzado.

Para determinar las diferencias de las medidas de estado cardiorrespiratorio, biomarcadores del envejecimiento y las de los procesos cognitivos en función del grupo de edad, se realizó un análisis simple de la covarianza (ANOVA). Una vez analizados los resultados de todas las pruebas, se observó un declive en el estado cardiorrespiratorio asociado a la edad, lo que sugería que la capacidad de realizar actividad física, de moderada a intensa, es menor conforme aumenta la edad. A pesar de ello, los niveles de estado cardiorrespiratorio que mostraba cada grupo de edad se encontraban en la media, sugiriendo el efecto beneficioso de dicho factor en la salud de los adultos mayores. Los biomarcadores del envejecimiento del cerebro se mostraron fuertes predictores del envejecimiento cognitivo, lo que mantiene la hipótesis del papel mediador del envejecimiento biológico en el envejecimiento cognitivo. Además, la influencia del estado cardiorrespiratorio se encontró mayor para los procesos de atención, memoria de trabajo y velocidad de procesamiento, frente a los componentes cognitivos de orden superior como son las funciones ejecutivas y la memoria, que implican la coordinación de más procesos.

Este estudio da muestra del efecto protector del estado cardiorrespiratorio en los declives cognitivos asociados al envejecimiento.

1.2. Pontifex et al. (2009) pretendieron determinar si el estado de salud se relaciona con un cambio general en el sistema de atención o si es selectivo a un aspecto específico de la atención. Emplearon la técnica de Potenciales Evocados para observar la respuesta que suscitaba una tarea visual en los componentes P3a y P3b, partiendo de la hipótesis de que la edad podría estar asociada con una reducción de la amplitud y una latencia mayor para dichos componentes.

Participaron un total de 48 sujetos, 25 jóvenes (de entre 18 y 22 años) y 23 ancianos (de entre 61 y 73 años). En el caso de los mayores participaron en una prueba en cinta estática (protocolo de Balke¹⁸⁰) para comprobar el volumen de consumo de oxígeno máximo (VO₂ Max), como medida del estado cardiorrespiratorio. Se emplearon en condiciones distintas la tarea clásica de discriminación visual *oddball* de dos estímulos y de tres estímulos. En el primer caso, los participantes debían responder presionando con el pulgar de la mano derecha, tan rápido como fuera posible y de manera acertada, ante la presencia de un *target*. El estímulo a discriminar era un círculo blanco de 5,5 cm que aparecía con una probabilidad de 0.20. También aparecían, como *no-target*, círculos blancos de 3 cm de diámetro, con una probabilidad de 0.80. En el caso de la condición de tres estímulos, el objetivo seguía siendo responder de la misma forma ante el *target* (círculo blanco de 5,5 cm de diámetro) que se presentaba con una probabilidad de 0.12. Los estímulos *no-target* de esta condición eran círculos blancos de 5cm de diámetro que aparecían con una probabilidad del 0.76. Además del incremento de la dificultad para diferenciar los *targets* de los *no-targets*, también se presentaban como estímulos distractores tableros de ajedrez compuestos por cuadrados de 2cm, que aparecían con una probabilidad de 0.12. Mientras los sujetos realizaban la tarea se registró la actividad electroencefalográfica (EEG) para obtener los componentes P3b, a partir de la condición *oddball* clásica, y P3a, a partir de la condición de tres estímulos.

La dificultad de la tarea fue medida usando el análisis ANOVA teniendo en cuenta la edad (jóvenes o mayores), el nivel de forma física (alto o bajo) y la condición de la tarea (*oddball* o tres estímulos).

Los resultados revelaron que los sujetos con un buen estado cardiorrespiratorio ejecutaban la tarea con TR menores y mostraban amplitudes de P3b mayores en la condición de dos estímulos. Cuando se trataba de la condición de tres

¹⁸⁰ El Protocolo de Balke supone caminar o correr en una cinta estática a una velocidad constante con incrementos graduales de la velocidad del 2% cada dos minutos hasta que el participante alcance el agotamiento.

estímulos sólo en los jóvenes con un buen estado cardiorrespiratorio se observaba la amplitud más amplia de P3b. Los adultos mayores presentaban una reducción en la habilidad para diferenciar los *targets* en esta condición con tres estímulos (ver Figura 1). De esta forma se evidenció que el estado de salud no ejercía protección frente a la edad del participante. Además, el estado de salud no parece alterar, según los resultados de este estudio, el componente P3a, de modo que el proceso de orientación atencional no parece afectado por esta variable.

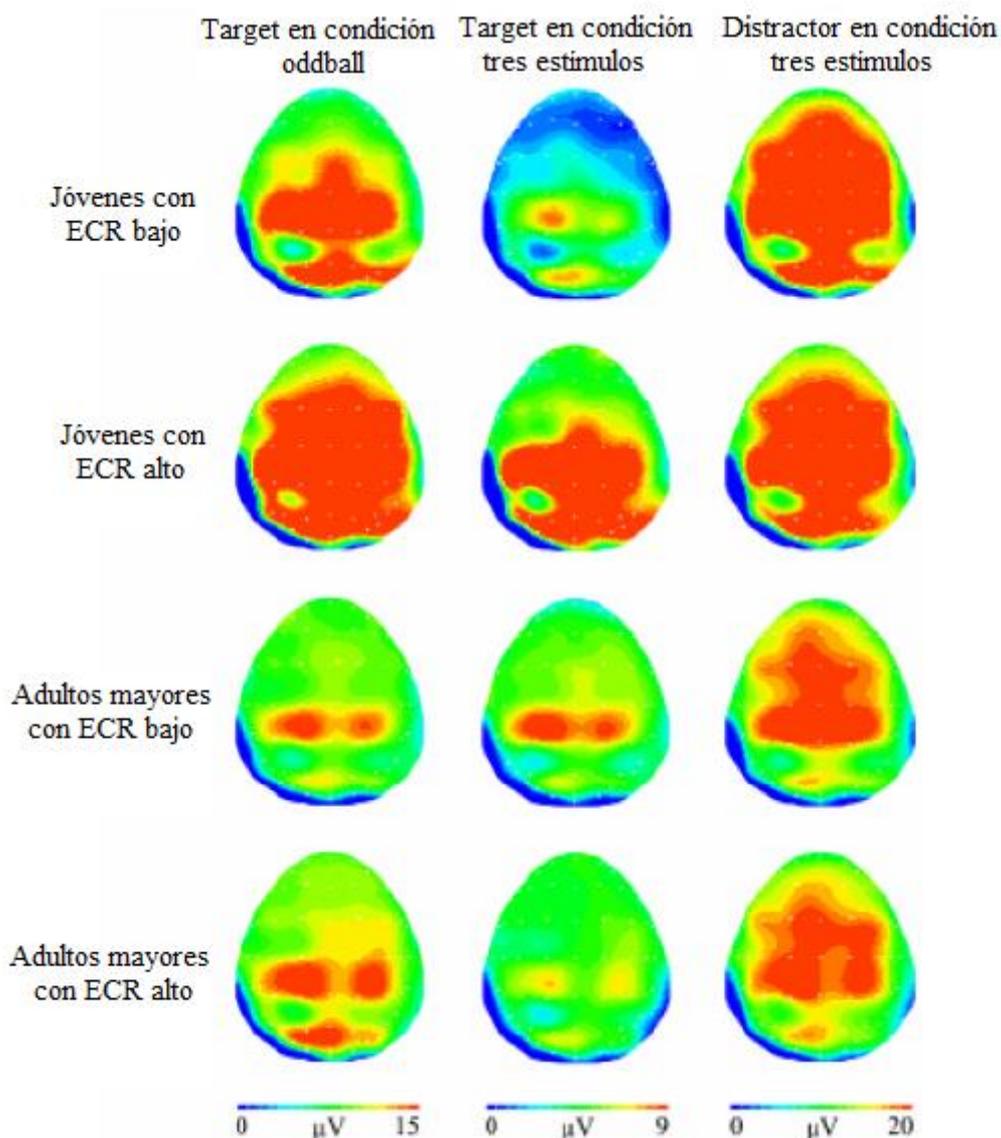


Figura 1. Mapas topográficos de la amplitud de los componentes P3a y P3b para cada grupo de edad y forma física según la condición del estímulo. Adaptada de Pontifex et al. (2009).

La conclusión que permite extraer este trabajo es la implicación del estado cardiorrespiratorio en la amplitud del componente P3b, para la condición sencilla, que ha sido asociado a localizaciones parietocentrales y con implicación en el proceso de toma de decisiones; sin embargo no tiene efectos sobre la amplitud del componente P3a, asociado a localizaciones frontocentrales y considerado como un componente endógeno relacionado con los procesos de orientación de la atención. En resumen, la asociación entre estado de salud cardiorrespiratoria y cognición parece estar mediada por la edad y la dificultad de la tarea.

1.3. Brown et al. (2010) examinaron la hipótesis de que el hecho de ser físicamente activo podría estar asociado con una mejor retención de la función cognitiva y la reserva cerebrovascular¹⁸¹ frente al hecho de ser sedentario, y que esa relación entre el estado de salud y la cognición tiene una base vascular. Para ello eligieron una muestra de 42 mujeres postmenopáusicas con edades comprendidas entre los 50 y 90 años que se sometieron a una prueba para medir el volumen de consumo de oxígeno máximo (VO₂ Max en cicloergómetro recostado), la reserva cerebrovascular, el flujo sanguíneo cerebral en respuesta a un test de reactividad vascular así como una medición de la función cognitiva. Además se tomaron muestras de sangre para determinar los niveles de hormonas ováricas. Utilizando ultrasonido *Doppler* transcraneal se obtuvieron medidas de la velocidad pico del pulso de la arteria cerebral media como un índice del flujo sanguíneo cerebral, en reposo, durante el ejercicio en cicloergómetro y en recuperación una vez finalizado éste. Por último, los sujetos completaron una batería de test neuropsicológicos, consistente con la publicada por el *National Institute of Neurological Disorders and Stroke-Canadian Stroke Network Vascular Cognitive Impairment Harmonization Standards* (Hachinski et al., 2006) para obtener medidas de 11 funciones cognitivas. Una vez recogidos todos los datos se dividió la muestra según dos variables: edad (jóvenes de 50 a 64 años y mayores de 65 a 90) y forma física (activa o sedentaria, en función del valor de VO₂ Max predicho según la edad). Se aplicaron estadísticos descriptivos en todas las variables: coeficientes de correlaciones para determinar la fuerza de la asociación entre edad, estado de salud, medidas vasculares y cognición; análisis de covarianza (ANCOVA) para controlar las variables extrañas, y regresiones lineales para explicar el valor predictivo del estado físico en la salud vascular.

El grupo de mujeres de buena forma física presentaba una presión arterial media más baja en comparación con el grupo sedentario en todas las condiciones de la prueba. Teniendo en cuenta la edad, las mujeres jóvenes sólo tenían una línea base más baja de presión arterial media en comparación con el grupo de mayores en la condición de hipercapnia¹⁸². En cuanto a la conductancia cerebrovascular era mayor en el grupo activo frente al sedentario, tanto en reposo como en ejercicio sub-máximo o en recuperación. Por otra parte las puntuaciones en funciones cognitivas eran más altas en el grupo joven teniendo en cuenta los niveles educativos y el estado de salud. Se encontraron las mismas relaciones para la velocidad cognitiva, percepción, habilidad verbal y funciones ejecutivas. La función cognitiva correlacionaba con el volumen de consumo de oxígeno máximo, siendo más alto en el grupo activo en comparación con el sedentario. De esta forma el estudio permitió identificar una asociación fuerte y significativa entre el estado de salud y la cognición, y entre el estado de salud y la función cerebrovascular de forma que los efectos beneficiosos del estado de salud en la cognición están mediados, al menos en parte, a nivel macrovascular por el estado de funcionamiento cerebrovascular. También se mostró evidencia de un incremento en la conductancia cerebrovascular con el buen estado de salud, de la misma forma que éste muestra un efecto protector en la vasculatura, y la conductancia cerebrovascular y la presión arterial son predictores del funcionamiento cognitivo.

En conclusión, el estudio provee evidencia de que el estado cardiorrespiratorio contribuye al mantenimiento de la salud de la función cerebral y cognitiva en el proceso de envejecimiento.

1.4. Prakash et al. (2011) examinaron si un nivel alto en el estado cardiorrespiratorio estaba asociado con un reclutamiento diferencial de las regiones de procesamiento anterior y posterior durante la ejecución de una modificación de la tarea de Stroop. En este caso los participantes debían responder al color en el que estaba impresa la palabra, ignorando su significado. Se presentaron cuatro condiciones de ensayo: dos en las que color y palabra eran incongruentes (elegible en el caso de que la palabra designara a un color de los posibles en cada ensayo o inelegible, cuando la palabra designaba un color fuera del abanico de elección), además de la condición neutral en la que no había interferencia entre color y palabra y la condición congruente, en ellas se registraba tanto el tiempo de reacción (TR) como la exactitud de las respuestas. Se seleccionó una muestra de 70 adultos mayores sanos (46 hombres y 24 mujeres, de edades entre 60 y 75 años) que, además debían realizar una prueba de ejercicio graduado consistente en caminar en una cinta estática y el

¹⁸¹ La reserva cerebrovascular hace referencia a cuánto puede incrementar la perfusión cerebral desde el punto de referencia tras haber recibido estimulación. Para medir el flujo sanguíneo cerebral se puede utilizar TEP o, como medida no-invasiva y de fácil ejecución, *Doppler* transcraneal, como es el caso de este estudio. Los índices de medida de la reserva vascular son la Conductancia Cerebrovascular y la presión arterial (PA).

¹⁸² La hipercapnia es una concentración inusualmente alta de dióxido de carbono (CO₂) en sangre, ante lo cual el cerebro requiere de un aumento significativo del flujo sanguíneo.

subsiguiente test de Rockport para medir el volumen de consumo de oxígeno. El VO_2 fue medido en aire expirado en intervalos de 30 segundos hasta alcanzar el VO_2 Pico que marcaba el fin de la prueba.

Para localizar las áreas sensibles al color y a la palabra en las regiones visuales ventrales los participantes fueron sometidos a escáner empleando la técnica de resonancia magnética funcional (IRMf) mientras se les presentaban destellos en blanco y negro y en color, o bien palabras, cadenas de caracteres o no-palabras.

Los datos conductuales, tiempos de reacción y tasas de error, fueron analizados mediante el análisis de varianza, en cada caso contando con cuatro niveles para las cuatro condiciones de la tarea. También se usaron correlaciones parciales para examinar la asociación entre el estado cardiorrespiratorio y las medidas conductuales para cada condición, después de hallar la varianza asociada a la edad, género y educación.

Bajo estas condiciones se encontraron TR mayores en el caso de la condición incongruente-elegible, de manera que el efecto de la condición era significativo. De la misma forma, la tasa de error es mayor para la condición incongruente-elegible. En cuanto al reclutamiento de las regiones corticales, se encontró una inhabilidad por parte de los adultos mayores para aumentar los recursos corticales de las regiones de procesamiento anteriores en respuesta a la condición más demandante de la tarea Stroop. Aun así, incrementando el estado cardiorrespiratorio se encontraba un mejor reclutamiento para las dos condiciones más demandantes de la tarea. De esta forma se evidenció la asociación entre el estado cardiorrespiratorio y un mejor reclutamiento del córtex prefrontal y parietal en respuesta al incremento en las demandas de la tarea en adultos mayores (ver Figura 2). Por otra parte, se localizaron áreas del córtex visual ventral sensibles a los estímulos de color y palabra por separado. En el caso del contraste color/blanco y negro se activó el lóbulo occipital, con un pico en el giro fusiforme. En cuanto al contraste palabra/sucesión de caracteres/no-palabra la activación se produjo en el córtex temporal medial izquierdo. Llevando la modulación de las regiones sensibles al color y a las palabras a la tarea Stroop, se encontró mayor activación de las áreas sensibles al color frente a las sensibles a las palabras. Además se observó que el estado cardiorrespiratorio no estaba asociado con un incremento o disminución en las áreas sensibles al color o a las palabras en cualquiera de las condiciones de la tarea Stroop. Por lo que el estado de salud no estaba relacionado con un mejor reclutamiento de las áreas visuales ventrales.

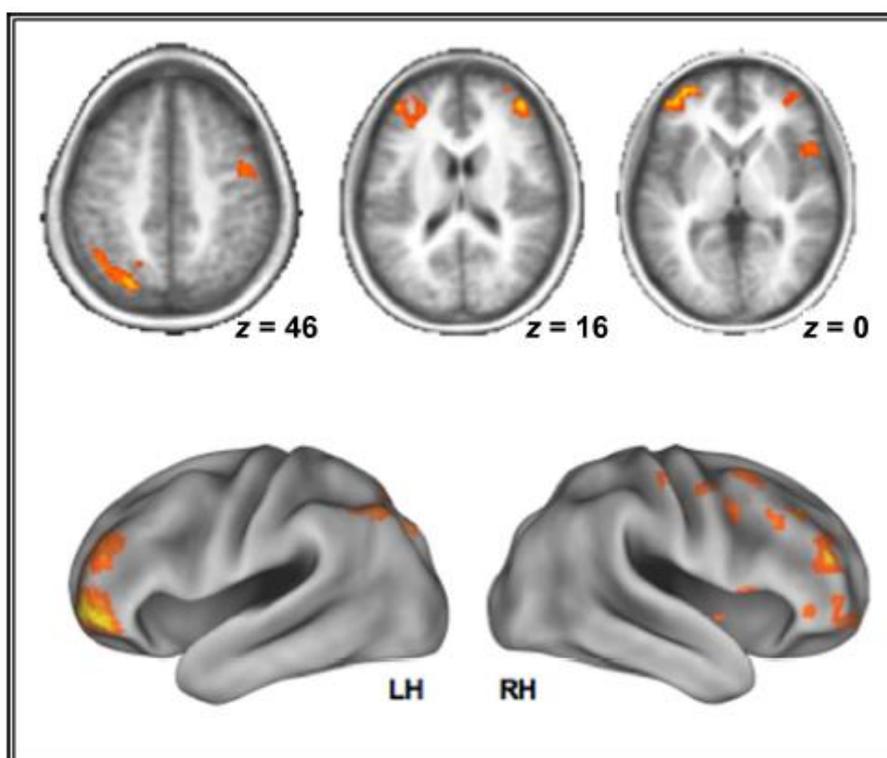


Figura 2. Regiones corticales activadas durante la condición incongruente-elegible y que muestran una asociación positiva con el estado cardiorrespiratorio. Adaptada de Prakash et al. (2011). LH: hemisferio izquierdo; RH: hemisferio derecho

La conclusión que se extrae de este artículo es que el estado cardiorrespiratorio está asociado de manera diferente con las regiones de procesamiento anteriores y posteriores. Mientras que en las regiones de procesamiento anteriores el estado cardiorrespiratorio está asociado con un aumento en el reclutamiento para las condiciones más demandantes de la tarea, las regiones de procesamiento posterior no muestran relación con el estado cardiorrespiratorio.

1.5. Johnson et al. (2012) exploraron las relaciones potenciales entre una medida del estado cardiorrespiratorio y la anisotropía fraccional (AF) de la materia blanca cerebral, así como las existentes entre el estado cardiorrespiratorio y los componentes de la Difusividad Media (DM), la Difusividad Radial (DR) y la Difusividad Axial (DA). Mientras que la AF ofrece una medida resumen de la integridad microestructural, los componentes DM, DA y DR ofrecen medidas más específicas. En el primer caso se trata de una medida inversa de la densidad de la membrana, sensible tanto en Materia Blanca como en Materia Gris; DA varía ante los cambios en Materia Blanca y patología y decrece en daños axonales; DR, por su parte, aumenta en Materia Blanca en casos de desmielinización y puede verse afectado por los cambios en los diámetros axonales.

Participaron en el estudio 26 adultos de entre 60 y 69 años y completaron un test de ejercicio máximo graduado para obtener una medida del estado cardiorrespiratorio (VO_2 Pico), también se registró el tiempo total en la cinta y el ritmo cardíaco en recuperación. Por otra parte se obtuvieron datos mediante imágenes con tensor de difusión (DTI) usando resonancia magnética funcional. Para analizar los datos se empleó el análisis de varianza (ANOVA) que comparó el número normalizado de *voxel* conectado con diferentes áreas corticales.

En cuanto a los resultados, a pesar de no investigar diferencias de sexo en cuanto al estado cardiorrespiratorio, encontraron que los hombres mostraban valores más altos para peso, altura, VO_2 Pico, tiempo total en la cinta y ritmo cardíaco en recuperación. Se observó una correlación positiva entre el estado cardiorrespiratorio y FA en una porción del cuerpo calloso que se extendía a la porción posterior del genu. Además, la tolerancia al ejercicio junto con el VO_2 Pico correlacionaron significativamente con la integridad de la materia blanca en el cuerpo calloso. En cuanto al tensor por difusión mostró una correlación negativa entre DR y el estado cardiorrespiratorio y una ausencia de correlación con respecto a MD o DA (ver Figura 3). Estos resultados sugieren, según los autores, que el estado cardiorrespiratorio puede beneficiar la integridad de la mielina, incluso en ausencia de cambios detectables en los tejidos del cuerpo calloso, y que las porciones del cuerpo calloso que correlacionan más con la integridad de la sustancia blanca son las que se interconectan con las regiones homólogas del córtex premotor implicadas en el planificación motora.

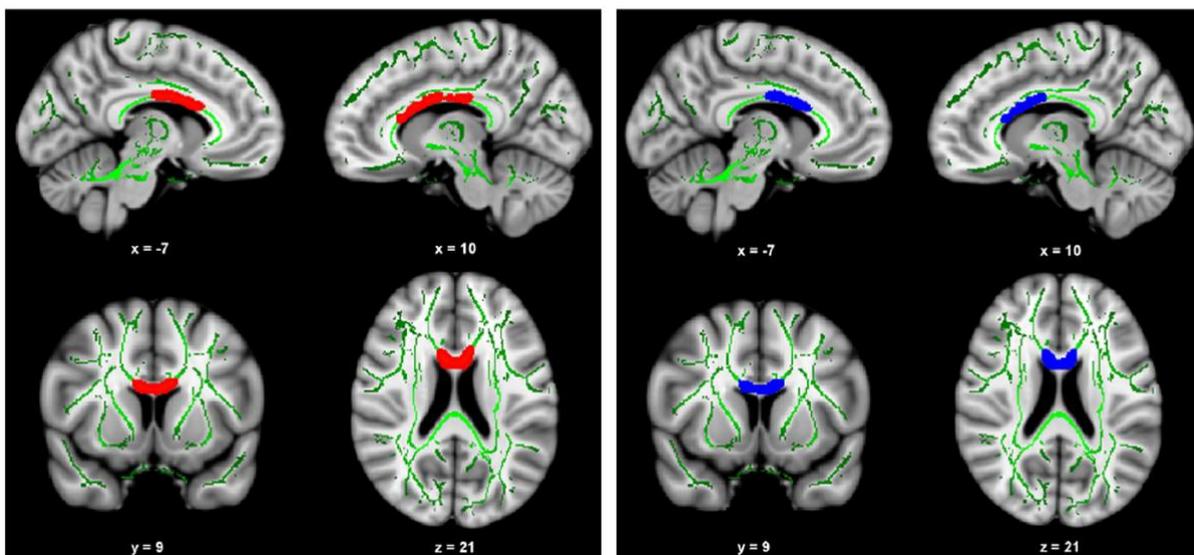


Figura 3. Mapas topográficos que muestran que el ECR correlaciona positivamente con la AF (izquierda, en rojo) y negativamente con la DR (derecha, en azul) en el cuerpo calloso. Adaptada de Johnson et al. (2012).

1.6. Chokron et al. (2013) estudiaron el efecto del envejecimiento normal y de la enfermedad vascular en la atención selectiva. Para ello compararon la ejecución de jóvenes y personas mayores sin enfermedades cardiovasculares con la de pacientes que habían sufrido infartos de miocardio por enfermedad cardiovascular o un *bypass* coronario. La muestra estaba formada por 13 adultos jóvenes (con una media de edad de 28,8 años), 23 adultos mayores (con media de edad de 56,5 años), 8 pacientes que habían sufrido infarto de miocardio en los últimos dos meses (con media de edad de 59,3 años) y 9 pacientes sometidos a un *bypass* coronario también en los últimos dos meses (con media de edad de 65,3 años). La tarea, una versión de la tarea de *Flankers* de Eriksen, consistía en detectar un estímulo *target* (la letra O) bien presentada como una letra sola y grande, o bien como una letra pequeña rodeada de otros estímulos (las letras G y Q). En algunos ensayos se presentaban como distractor otros caracteres (la letra C o la cifra 0) en lugar del *target*, en esos casos el sujeto debía ignorar los estímulos. Además, para responder a la detección del estímulo-objetivo debían pulsar el botón del ratón correspondiente al lado del campo visual en que éste aparecía. Tras registrar el tiempo de reacción (TR), entre el momento en que aparecía el *target* y la respuesta del sujeto, y el número de detecciones correctas, se compararon los resultados por grupos establecidos en función del estado cardiovascular. Para analizar los resultados se empleó un análisis de varianza de tres factores que incluía el grupo según edad y estado cardiovascular, el tipo de estímulo y el campo visual.

De esta forma obtuvieron que en todos los grupos los TR eran menores cuando el estímulo a detectar se presentaba aislado y grande. Además se confirmaba la hipótesis del cambio de especialización hemisférica con el envejecimiento, pasando de ser el derecho en el caso de los jóvenes, al izquierdo para los adultos mayores. Por otra parte, se encontró que el tipo de enfermedad cardíaca tenía un efecto significativo sobre el TR de la tarea, siendo menor que el del grupo control en la condición sin atención selectiva, algo que podría ser consecuencia del estrés post-infarto. Por el contrario, en la condición con atención selectiva, estos pacientes exhibieron una ejecución más lenta.

Los resultados del estudio parecen demostrar el efecto que tiene tanto el envejecimiento como la enfermedad cardiovascular en el proceso de atención selectiva así como la organización funcional para este tipo de tareas.

2. ESTUDIOS DE REVISIÓN.

2.1. McAuley et al. (2004) realizaron una revisión de la investigación acerca de la influencia del estado cardiorrespiratorio en el cerebro y la cognición. Examinaron la utilidad de la actividad física como estrategia comportamental para mejorar la función cognitiva en los adultos mayores a través de sus efectos en el estado cardiovascular. Los primeros estudios que compararon el funcionamiento cognitivo de adultos mayores en baja y alta forma encontraron que los individuos en buena forma ejecutaban mejor y más rápido una variedad de tareas perceptivas, cognitivas y motoras. Madden (1988) o Kramer et al. (1999) aislaron los efectos del entrenamiento físico de otros factores en términos de su influencia en la cognición. En estudios longitudinales se encontró una mayor variedad de resultados que relacionan ambas variables, sin embargo su interpretación es complicada ya que se trata de estudios donde varía las técnicas de medición del estado cardiorrespiratorio, las características de la muestra. Colcombe y Kramer (2002) realizan un meta-análisis para determinar si los efectos del estado físico en la cognición pueden ser diferentes al agregar datos al estudio longitudinal, y si esos efectos pueden estar moderados por factores como la edad, la longitud, la intensidad del ejercicio físico o la naturaleza de las tareas. Se incluyeron en esta revisión los estudios llevados a cabo entre 1966 y 2001. Los resultados más relevantes fueron el efecto significativo del entrenamiento de ejercicio aeróbico así como sus efectos selectivos en la función cognitiva. Además también se puso en evidencia el efecto moderador del número de variables que ejercen influencia entre entrenamiento físico y cognición, por ejemplo siendo más eficaz cuando los programas de actividad física se combinan con entrenamiento de la fuerza y la flexibilidad.

En cuanto a la investigación realizada sobre los efectos del estado de salud en la función y estructura cerebral con animales, ésta comenzó sobre ratas y ratones jóvenes para estudiar su plasticidad cerebral. Posteriormente se obtuvieron datos sobre los cambios morfológicos en la estructura cerebral de animales mayores. Comparando muestras de ratas que realizaban ejercicio aeróbico o ejercitaban la habilidad motora se observó que los efectos eran diferentes para la vasculatura y la conectividad sináptica del cerebro. Por otra parte, las intervenciones con entrenamiento aeróbico que incluían un protocolo de entrenamiento de fuerza proveían más beneficios a nivel cognitivo que sólo el componente aeróbico.

Volviendo a la investigación en humanos, en este caso para centrarse en la relación entre estado de salud y estructura y función cerebral, se ha encontrado que los adultos mayores con mejores niveles de estado aeróbico mostraban una

pérdida menor de sustancia gris en los lóbulos frontal, temporal y parietal y menos tejido perdido en los tractos anterior y posterior de materia blanca. Al igual que ocurría con las ratas, se encontró un incremento en la densidad cortical en mujeres que se ejercitaban, además de efectos positivos en la post-menopausia. Por otra parte, el estado aeróbico tiene influencias en la función cortical, lo que lleva a pensar que el reclutamiento de las áreas involucradas en la atención selectiva podrían incrementar su actividad con un mejor nivel de base para el estado aeróbico y cardiovascular.

Otro factor importante a tener en cuenta al poner en relación actividad física y salud es el componente comportamental. La adherencia al programa de entrenamiento debe ser tenida en cuenta ya que de ella depende el estilo de vida, activo o sedentario, de los adultos mayores. Se trata de facilitar estrategias de identificación para maximizar la realización de actividad física a lo largo del tiempo.

La revisión de McAuley et al. concluye con la necesidad de aumentar el campo de estudio en humanos teniendo en cuenta el creciente número de técnicas de neuroimagen para mejorar el conocimiento de las implicaciones del estado de salud sobre la reducción de enfermedades cardiovasculares, diabetes, hipertensión o plasticidad cortical.

2.2. Hayes et al. (2013) realizaron una revisión de los estudios de neuroimagen que examinaban el estado cardiorrespiratorio en adultos mayores. Para ello organizaron la investigación según los trabajos se centraran en la estructura o la función cerebral y, dentro de esta clasificación, los dividieron en estudios transversales y de intervención.

El análisis más común para medir la estructura cerebral es la morfometría basada en vóxel (*voxel based morphometry*, VBM) que ofrece mapas diferenciando los diferentes tipos de tejidos. Siguiendo esta técnica, Colcombe y sus colegas demostraron que el estado cardiorrespiratorio estaba asociado a una atenuación del declive relacionado con la edad atenuado en la densidad de los tejidos de la materia blanca y materia gris de las regiones fronto-parietales, incluyendo el córtex prefrontal, el superior parietal y el temporal. Estudios posteriores (Gordon et al., 2008; Weinstein et al., 2012), basados en pruebas en cinta de correr para obtener medidas de VO₂ Max, informaron de una asociación entre el estado de salud y el volumen de materia gris en el córtex prefrontal ventrolateral y dorsolateral, las regiones parietales laterales y el lóbulo temporal medial. Para examinar la relación entre el estado cardiorrespiratorio y la materia blanca del cerebro, se han llevado a cabo estudios con imágenes con tensor de difusión, el más reciente de ellos el de Johnson et al. (2012), detallado en el apartado 1.5. A pesar de que estos estudios muestran una consistencia limitada, debido a diferencias metodológicas, los resultados indican que el estado cardiorrespiratorio tiene un impacto positivo en la integridad de la materia blanca. Por otra parte, de esta revisión los autores concluyen que existe evidencia suficiente de que las regiones frontales-subcorticales median en la relación entre el estado cardiorrespiratorio y la ejecución en tareas que implican funciones ejecutivas. En cuanto a los datos en enfermos de Alzheimer, a pesar de ser limitados, sugieren una asociación positiva entre el estado cardiorrespiratorio y la estructura cerebral en pacientes con deterioro cognitivo atribuido a dicha enfermedad. Más concretamente, niveles bajos en el VO₂ Pico se asocian con reducciones del volumen en el giro parahipocámpico y en el giro inferior temporal, en la ínsula bilateral, en el giro lingual derecho y en el lado derecho del putamen.

En esta revisión, los autores encuentran que las evidencias más directas de la relación entre el estado cardiorrespiratorio y la salud cerebral vienen de los estudios de intervención con ejercicio aeróbico. Utilizando imágenes de resonancia magnética antes y después de la intervención se comprobó el impacto positivo del ejercicio en la estructura cerebral, por ejemplo con el incremento del volumen en el córtex cingulado anterior, en el motor suplementario, el giro frontal inferior derecho, el giro temporal superior izquierdo o la parte anterior del cuerpo calloso. Después de un año de entrenamiento aeróbico, los adultos mayores mostraron un aumento significativo en el VO₂ Max asociado al aumento del volumen de la zona anterior del hipocampo (Colcombe et al., 2006).

En cuanto a los estudios que relacionan el estado cardiorrespiratorio con la función cerebral Hayes et al. (2013) encuentran consistencia entre los estudios revisados en las regiones del córtex cingulado anterior, las regiones prefrontales laterales y las regiones parietales laterales durante tareas de control ejecutivo (i.e. Stroop o *Flankers*), tareas de recuperación de la memoria semántica y tareas de visionado pasivo. La relación entre el estado cardiorrespiratorio y el lóbulo temporal medial no está tan validada en los estudios de resonancia magnética funcional, lo que puede ser atribuido a la escasez de tareas implementadas durante la resonancia que activasen dicha región. También existe evidencia que sugiere una asociación positiva del estado cardiorrespiratorio y la función cerebral en los individuos con riesgo genético a padecer Alzheimer, aunque los estudios realizados hasta el momento no se centran en el estado cardiorrespiratorio sino en medidas de actividad física.

La revisión concluye que las intervenciones conductuales de bajo coste, como puede ser el ejercicio, tienen el potencial de provocar una mejora en la función cognitiva y en la neuroplasticidad en el envejecimiento cerebral. Los datos de los estudios realizados muestran que el estado cardiorrespiratorio está asociado con un mayor volumen cerebral en los enfermos de Alzheimer. Por último, los datos sugieren que las alteraciones en la integridad neural pueden ser contrarrestadas con programas de ejercicio de baja intensidad en un periodo de tiempo de aproximadamente 6 meses (ver Hayes et al., 2013).

CONCLUSIONES

La presente revisión bibliográfica aporta evidencias interesantes acerca de la influencia del estado cardiorrespiratorio en la función cerebral y cognitiva en general, y determinados procesos de atención en particular. El objetivo de este trabajo era poner en relación estos elementos con el envejecimiento, debido a que los cambios en el organismo que suceden en este período del ciclo vital, por incremento en las poblaciones actuales y sus efectos en las funciones cerebrales y cognitivas, suscitan un gran interés.

A nivel general, se ha encontrado apoyo empírico para determinar los efectos beneficiosos del estado cardiorrespiratorio en el funcionamiento cognitivo y la neuroplasticidad de los adultos mayores (McAuley et al., 2004; Newson & Kemps, 2006; Hayes et al., 2013). Esta relación, según Brown et al. (2010), está mediada macrovascularmente, esto es, el estado cardiorrespiratorio protege el sistema vascular, lo que permite una mejor irrigación del sistema cerebral, convirtiéndose por tanto en un factor predictivo del funcionamiento cognitivo.

Una cuestión sobre la que parece haber discrepancia es la de la participación del estado cardiorrespiratorio en los procesos que implican funciones ejecutivas de orden superior. Por una parte, Newson & Kemps (2006) encontraron una varianza mayor en relación con la atención, la memoria de trabajo y la velocidad de procesamiento, frente a la que presentaba con las funciones cognitivas de orden superior: funciones ejecutivas y memoria. En el sentido opuesto, la revisión de Hayes et al. (2013) centra su atención en que los efectos más marcados del estado cardiorrespiratorio se encuentran en tareas que dependen de las regiones fronto-parietales, encargadas de las funciones ejecutivas de orden superior (Colcombe & Kramer, 2003 en Hayes et al., 2013). Esta oposición puede tener su explicación en las diferencias metodológicas entre ambos estudios y sería interesante profundizar la investigación con estudios que se ocuparan de esta cuestión o bien como propuesta de línea de trabajo.

De los estudios revisados, tan sólo Johnson et al. (2012) hacen referencia a esta cuestión. En este caso, encuentran una asociación positiva entre la medida de estado cardiorrespiratorio (VO_2 Pico) y la Anisotropía Fraccional (AF) en una porción del cuerpo calloso cuyas fibras interconectan regiones del córtex prefrontal implicadas en la planificación motora. Esta evidencia parece seguir la línea del estudio de Colcombe & Kramer (2013) en vista de la relación entre la planificación motora y las funciones ejecutivas.

En cuanto a la implicación del estado cardiorrespiratorio en la ejecución de tareas de atención visual por parte de adultos mayores, la diversidad de técnicas y tareas empleadas en los estudios complica su comparación pero, al mismo tiempo, ofrece una variedad de resultados más amplia según en lo que se centre en cada caso.

En primer lugar, Pontifex et al. (2009) dieron cuenta de que un buen estado cardiorrespiratorio conllevaba mejores resultados conductuales en la tarea *oddball* y una amplitud mayor del componente P3b. De esta forma quedó constancia de la relación entre el estado cardiorrespiratorio y los procesos de evaluación y de toma de decisiones de la atención selectiva.

Por otra parte, se empleó la tarea Stroop, tarea habitual en el estudio de las funciones ejecutivas, para observar la relación entre el estado cardiorrespiratorio y el control atencional. De esta forma se encontró que los adultos mayores con un buen estado cardiorrespiratorio mostraban un incremento en la activación del córtex prefrontal y parietal, implicados en el proceso de control de la atención *top-down* (Prakash et al., 2011).

Por último, Chokron et al. (2013), confirman la hipótesis del cambio en la especialización hemisférica con la edad, pasando del hemisferio derecho al izquierdo para los adultos mayores en tareas de atención visual selectiva. Además la ejecución en este tipo de tareas puede verse afectada por la enfermedad cardíaca.

En cuanto a las limitaciones a la hora de realizar la revisión bibliográfica, la principal ha sido la escasez de investigación sobre el tema, que por otra parte es de desarrollo reciente, lo que ha llevado a tener que recurrir a fuentes en inglés y ha dificultado también la posibilidad de comparar resultados. Tomando esta limitación como algo positivo, se abre un campo

de investigación en el que sería interesante profundizar. Por ejemplo, evaluando la relación entre el estado cardiorrespiratorio de adultos mayores sanos y la ejecución en varias tareas que impliquen atención selectiva (i.e. *Flankers*, *oddball*, etc.), y más concretamente en aquéllas que presentan mayor validez ecológica (como es el caso de las de búsqueda visual), utilizando una técnica psicofisiológica o de neuroimagen funcional que permitiera examinar las relaciones entre el estado cardiorrespiratorio, la ejecución en estas tareas y la función cerebral.

Por tanto, quedando patente la importancia del estado cardiorrespiratorio para la función cerebral y cognitiva, lo más importante es que los estudios futuros permitan completar la información de este campo de investigación para poder aplicar sus resultados en programas preventivos que tengan por objetivo mantener dichas funciones en el proceso de envejecimiento.

Bibliografía

- Baddeley, A. D., Emslie, H. & Nimmo-Smith, I. (1994). *Doors and People: A test of visual and verbal recall and recognition*. Bury St. Edmunds, England: Thames Valley Test Company.
- Bowles, H. R., Fitzgerald, S. J., Morrow, J. R. Jr., Jackson, A. W. & Blair, S. N. (2004). Construct validity of self-reported historical physical activity. *Am. J. Epidemiol.* 160, 279–286. doi:10.1093/aje/kwh209
- Brown, A. D. et al. (2010). Effects of cardiorespiratory fitness and cerebral blood flow on cognitive outcomes in older women. *Neurobiology of Aging*, 31, 2047-2057. doi: 10.1016/j.neurobiolaging.2008.11.002
- Cardona Arango, M. D. & Peláez, E. (2012). Envejecimiento poblacional en el siglo XXI: oportunidades, retos y preocupaciones. *Revista Científica Salud Uninorte*, 28(2).
- Castillo Moreno, A. & Paternina Marín, A. (2006). Redes atencionales y sistema visual selectivo. *Universitas Psychologica Bogotá-Colombia*, 5, 305-325.
- Chokron, S., Helft, G. & Perez, C. (2013). Effects of Age and Cardiovascular Disease on Selective Attention. *Cardiovascular Psychiatry and Neurology*, 2013, 1-7. doi:10.1155/2013/185385
- Churchill, J. D., Galvez, R., Colcombe, S., Swain, R. A., Kramer, A. F., & Greenough, W. T. (2002). Exercise, experience and the aging brain. *Neurobiology of aging*, 23(5), 941-955. doi: 10.1016/S0197-4580(02)00028-3
- Colcombe, S. J., Erickson, K. I., Scalf, P. E., Kim, J. S., Prakash, R., McAuley, E., Cohen, N. J., et al. (2006). Aerobic exercise training increases brain volume in aging humans. *J. Gerontol. Series Biol. Sci. Med. Sci.* 61, 1166-1170. doi: 10.1093/gerona/61.11.1166
- Colcombe, S. J., Kramer, A. F., Erickson, K. I., Scalf, P., McAuley, E., Cohen, N. J., Webb, A., Jerome, G. J., Marquez, D. X. & 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. doi: 10.1073/pnas.0400266101
- Corbetta, M., Kincade, J. M., Ollinger, J. M., McAvoy, M. P. & Shulman, G. L. (2000). Voluntary orienting is dissociated from target detection in human posterior parietal cortex. *Nature neuroscience*, 3(3), 292-297. doi: 10.1038/73009
- Earles, J. L. & Salthouse, T. A. (1995). Interrelations of age, health and speed. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 50(B), 33-41. doi: 10.1037/0882-7974.12.4.675
- Eriksen, C. W. & Yeh, Y. Y. (1985). Allocation of attention in the visual field. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11(5), 583. doi: 10.1037/0096-1523.11.5.583
- Gordon, B. A., Rykhlevskaia, E. I., Brumback, C. R., Lee, Y., Elavsky, S., Konopack, J. F., et al. (2008). Neuroanatomical correlates of aging, cardiopulmonary fitness level, and education. *Psychophysiology*, 45, 825-838.
- Hachinski, V., Iadecola, C., Peterson, R. C., Breteler, M. M., Nyenhuis, D. L., Black, S. E., Powers, W. J., DeCarli, C., Merino, J. G., Kalaria, R. N., Vinters, H. V., Holtzman, D. M., Rosenberg, G. A., Wallin, A., Dichgans, M., Marler, J. R., Leblanc, G. G. (2006). National Institute of Neurological Disorders and Stroke-Canadian Stroke Network Vascular Cognitive Impairment Harmonization Standards. *Stroke*, 37, 2220-2241.
- Hayes, S. M., Hayes, J. P., Cadden, M. & Verfaellie, M. (2013). A review of cardiorespiratory fitness-related neuroplasticity in the aging brain. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 5(31), 1-16. doi: 10.3389/fnagi.2013.00031
- Hopf, J. M., Luck, S. J., Girelli, M., Hagner, T., Mangun, G. R., Scheich, H., et al. (2000). Neural sources of focused attention in visual search. *Cerebral Cortex*, 10, 1233–1241. doi: 10.1093/cercor/10.12.1233
- Instituto Nacional de Estadística (2013). Proyección de la Población de España a Corto Plazo 2013–2023. Madrid: INE. Recuperado de: <http://www.ine.es/>
- Jackson, A. S., Blair, S. N., Mahar, M. T., Wier, L. T., Ross, R. M. & Stuteville, J. E. (1990). Prediction of functional aerobic capacity without exercise testing. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 22(6), 863-870.
- James, W. (1989). *Principios de psicología*. México, DF: Fondo de Cultura Económica.
- Johnson, N. F., Kim, C., Clasey, J. L., Bailey, A. & Gold, B. T. (2012). Cardiorespiratory fitness is positively correlated with cerebral white matter integrity on healthy seniors. *NeuroImage*, 59, 1514-1523. doi: 10.1016/j.neuroimage.2011.08.032
- Lorenzo López, L. (2007). *Psicofisiología de la atención visual y envejecimiento: su estudio mediante potenciales evocados*. (Tesis doctoral, Universidade de Santiago de Compostela). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10347/2338>
- Lorenzo-López, L., Amenedo, E. & Cadaveira, F. (2008). Feature processing during
- visual search in normal aging: Electrophysiological evidence. *Neurobiology of*

- *Aging*, 29, 1101–1110. doi: 10.1016/j.ijpsycho.2009.04.006
- Lorenzo-López, L., Gutiérrez, R., Moratti, S., Maestú, F., Cadaveira, F. & Amenedo, E. (2011). Age-related occipito-temporal hypoactivation during visual search: Relationships between mN2pc sources and performance. *Neuropsychologia*, 49, 858-865. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.015
- Lustig, C., Hasher, L. & Tonev, S. T. (2001). Inhibitory control over the present and the past. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13 (1/2), 107-122. doi: 10.1080/09541440042000241
- Madden, D. J. (1990). Adult age differences in attentional selectivity and capacity. *European Journal of Cognitive Psychology*, 2(3), 229-252.
- Madden, D. J., Whiting, W. L. & Huettel, S. A. (2005). Age-related changes in neural activity during visual perception and attention. En R. Cabeza, L. Nyberg y D.C. Park (Eds.), *Cognitive neuroscience of aging: linking cognitive and cerebral aging* (pp. 157-185). Oxford: University Press.
- McAuley, E., Kramer, A. F. & Colcombe, S. J. (2004). Cardiovascular fitness and neurocognitive function in older Adults: a brief review. *Brain, Behaviour, and Immunity*, 18, 214-220. doi: 10.1016/j.bbi.2003.12.007
- McAuley, E., Szabi, A. N., Mailey, E. L., Erickson, K. I., Voss, M., White, S. M., et al. (2011). Non-exercise estimated cardiorespiratory fitness: associations with brain structure, cognition and memory complaints in older adults. *Mental health and physical activity*. 4, 5-11. doi: 10.1016/j.mhpa.2011.01.001
- Milner, B. (1971). Interhemispheric differences in the localization of physiological processes in man. *British Medical Bulletin*, 27, 272-277.
- Newson, R.S & Kemps, E. B. (2006). Cardiorespiratory Fitness as a Predictor of Successful Cognitive Ageing. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 28(6), 949-967. doi: 10.1080/13803390591004356
- Pontifex, M. B., Hillman, C. H. & Polich, J. (2009). Age, physical fitness, and attention: P3a and P3b. *Psychophysiology*, 46(2), 379-387. doi: 10.1111/j.1469-8986.2008.00782.x
- Prakash, R. S. et al. (2011). Cardiorespiratory fitness and attentional control in the aging brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4 (229), 1-12. doi: 10.3389/fnhum.2010.00229
- Rabbitt, P. (1965). An age-decrement in the ability to ignore irrelevant information. *Journal of Gerontology*, 20(2), 233-238. doi: 10.1093/geronj/20.2.233
- Raz, N., Gunning-Dixon, F., Head, D., Rodrigue, K. M., Williamson, A. & Acker, J. D. (2004). Aging, sexual dimorphism, and hemispheric asymmetry of the cerebral cortex: replicability of regional differences in volume. *Neurobiology of aging*, 25(3), 377-396. doi:10.1016/S0197-4580(03)00118-0
- Robertson, I. H., Ward, T., Ridgeway, V. & Nimmo-Smith, I. (1994). *Test of Everyday Attention*. Bury St Edmonds, Suffolk, UK: Thames Valley Test Company.
- Ruz, M. & Lupiáñez, J. (2002). A review of attentional capture: On its automaticity and sensitivity to endogenous control. *Psicológica*, 23(2), 283-369.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662. doi: 10.1037/0096-3445.121.1.15
- Valero Herreros, M. (2011). *Efectos de la actividad física sobre la actividad cerebral y la variabilidad de la frecuencia cardiaca en mayores*. (Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona). Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/4783>
- Wechsler, D. (1997). *WAIS-III: Wechsler Adult Intelligence Scale-3rd ed*. San Antonio: Psychological Corporation.
- Weinstein, A. M., Voss, M. W., Prakash, R. S., Chaddock, L., Szabo, A., White, S. M., et al. (2012). The association between aerobic fitness and executive function is mediated by prefrontal cortex volume. *Brain Behav. Immun.*, 26, 811-819. doi: 10.1016/j.bbi.2011.11.008