



Trabajo Fin de Grado

Efectos neurocognitivos de la actividad física: Un metaanálisis de estimación de probabilidad de activación de fMRI

Neurocognitive effects of physical activity: an Fmri activation likelihood estimation meta-analysis

Autor/es

Luis Omar Díaz Fernández

Director/es

Elena Salillas Pérez

Grado en Psicología

2024



Facultad de
Ciencias Sociales
y Humanas - Teruel
Universidad Zaragoza

Resumen

A través de los años se ha tenido claro el rol del deporte en nuestro bienestar y salud, pero, ¿Cómo produce estos beneficios? ¿Se limitan sólo a lo físico? Este metaanálisis pretende clarificar estas dudas a través de técnicas de neuroimagen para poder mostrar cómo el deporte produce cambios a nivel neurocognitivo en las personas. La literatura existente se agrupó en función de los efectos del ejercicio físico a corto y largo plazo. El metaanálisis diferencia las bases cerebrales de los efectos cognitivos causados por el ejercicio físico pre y post entrenamiento, de aquellos efectos debidos a la práctica habitual del deporte. Los resultados muestran que el ejercicio físico a corto plazo se relaciona con activaciones en el precúneo y cingulado posterior. La práctica habitual se relaciona con efectos en el polo temporal izquierdo. En general, ambos tipos de estudios, tomados en conjunto, parecen generar efectos en el polo temporal y cambios funcionales en la corteza sensoriomotora y vía piramidal.

Palabras clave Actividad física, Cognición, fMRI, Ejercicio, Función ejecutiva, Precúneo

Abstract

Over the years, the role of sport in our well-being and health has been clear, but how does it produce these benefits? Are they limited only to the physical? This meta-analysis aims to clarify these doubts through neuroimaging techniques to show how sport produces neurocognitive changes in people. The existing literature was grouped based on the short and long-term effects of physical exercise. The meta-analysis differentiates the cerebral bases of the cognitive effects caused by pre- and post-training physical exercise from those effects due to the regular practice of sport. The results show that short-term physical exercise is related to activations in the precuneus and posterior cingulate. Regular practice is related to effects on the left temporal pole. In general, both types of studies, taken together, seem to generate effects on the temporal pole and functional changes in the sensorimotor cortex and pyramidal way.

Keywords Physical Activity, fMRI, Cognition, Exercise, Executive Function, Precuneus

Introducción

La cognición se puede definir como los procesos de los que un organismo hace uso para organizar la información recibida. Esto incluye adquirir la información (percepción), seleccionarla (atención), representarla (comprensión), retenerla (memoria), y usarla para guiar el comportamiento (razonamiento y coordinación de outputs motores). (Harada et al., 2013). Estos procesos son necesarios para nuestra supervivencia y bienestar. Debido a que nuestra esperanza de vida se ha incrementado gracias a la medicina moderna, ha aumentado en gran medida la incidencia de enfermedades neurodegenerativas y de declinación cognitivo (Rivero-Serrano & Martínez., 2011). Por ello, las investigaciones sobre preservación de funciones cognitivas son más y más relevantes. Los estudios más recientes sobre funciones cognitivas apuntan a hacer especial hincapié en los cambios en el estilo de vida, enfatizando el rol de la actividad y el ejercicio físico (Bherer et al., 2013) (Hillman et al., 2008).

¿Pero qué significan realmente estos últimos conceptos? Si bien en el lenguaje cotidiano se usan como sinónimos, existen ligeras diferencias entre estos, la *actividad física*, se puede definir como cualquier movimiento corporal producido por los músculos esqueléticos que produzca un gasto energético, mientras que el *ejercicio físico* sería cualquier actividad física que esté planificada, estructurada y repetida con la intención de adquirir, mantener o mejorar la condición física. (Caspersen et al., 1985) El *deporte* por otra parte sería una actividad física que involucra una serie de reglas o normas a desempeñar dentro de un espacio o área determinada. (Ibarra., 2015)

Amplia investigación demuestra que el ejercicio físico tiene beneficios tanto en niños (Eime et al., 2013) como en adultos (Booth et al., 2012) (Oja et al., 2015). Sin embargo, este también tiene sus puntos negativos como por ejemplo desórdenes alimenticios (Joy et al., 2016) o lesiones (Soligard et al., 2016). Si bien cabe decir que estos “contras” tienen su

aparición sobre todo en categorías de élite en las cuales existe un componente de exigencia mucho mayor y un ambiente más hostil, y no tanto en deporte de población general, donde los beneficios son mucho mayores y los riesgos muy pequeños.

Por ejemplo, según un estudio de Stillman de 2020, existen diversos ámbitos en los que el deporte tiene influencia, como por ejemplo el social (incremento de relaciones sociales), cerebral (materia gris, materia blanca, estructura y función), psicológico (estado de ánimo).

Debido a esto no es de extrañar que cada vez más se intente fomentar la práctica de actividad física en la población general, previniendo del decaimiento cognitivo natural de la edad y mejorando el bienestar de las personas (Harada et al., 2013).

Pese a que cada vez más personas saben que la actividad y el ejercicio físico son beneficiosos para el cerebro, no son tan conocidos los efectos concretos a nivel neuronal y cognitivo, es decir, las bases cerebrales subyacentes a toda la experiencia deportiva. Este metaanálisis pretende abordar esta carencia a través de una recopilación de estudios recientes acerca de cómo influyen las intervenciones de ejercicio físico en la activación del funcionamiento cerebral además de darle un carácter cuantitativo a las revisiones cualitativas que ya existen.

Existe en la literatura un metaanálisis sobre esta temática (Yu et al., 2021) que difiere del presente trabajo en múltiples aspectos. Estos autores muestran cambios significativos en la activación funcional del lóbulo parietal izquierdo, sobre todo el área del precúneo y se extiende, en menor medida, hasta el lóbulo parietal inferior y superior, giro cingulado anterior y cingulado posterior. Así como las redes asociadas a estas regiones parietales (red frontoparietal, red de atención dorsal y red neuronal por defecto).

El presente metaanálisis también agrupará estudios que abordan los efectos del ejercicio físico en la cognición. Otras revisiones (Gallardo-Gómez et al., 2022; Álvarez-

Bueno et al., 2017) se queda a un nivel descriptivo cualitativo, o bien, cuando han realizado un metaanálisis, han agrupado estudios de un modo muy amplio. Ello incrementa la potencia estadística, pero se pierde homogeneidad y por tanto limita las conclusiones.

En contraste con el estudio de (Yu et al., 2021), aquí subagruparemos los estudios existentes para poder responder a lo siguiente: en primer lugar, ¿Qué áreas cerebrales se activan consistentemente entre estudios que usan fMRI como técnica con diferentes tareas? En segundo lugar y como veremos, el enfoque de los estudios varía. Algunos estudios miden los efectos del ejercicio físico continuado otros, sin embargo, incluyen el ejercicio físico en su diseño experimental y observan su efecto inmediato. Esta es una diferenciación importante pues nos facilita conocer los efectos cognitivos del ejercicio a corto y largo plazo, que no tienen por qué ser los mismos. Permite además observar si, por ejemplo, una sesión breve de ejercicio físico impacta en nuestra actividad cerebral y cómo. En otras palabras, el presente metaanálisis pretende concreción en función de este aspecto, y no una agrupación amplia de estudios muy diversos.

Método

Fuentes de datos, criterios de inclusión y selección de estudios. (Revisión sistemática)

La búsqueda de artículos fue hecha a través de Alcorze y Pubmed en el periodo de finales de 2023-principios de 2024, usando los términos “Sports and Children and fmri” y “Sports and adults and fmri”, una vez hecho esto se cribaron los 1635 y 8158 estudios obtenidos respectivamente en Pubmed y 319 y 469 estudios obtenidos en Alcorze, utilizando únicamente aquellos que estén hechos en población general, es decir, se descartaron estudios de lesiones, traumatismos, psicopatologías, trastornos del aprendizaje..., los cuales representaban la mayoría de resultados obtenidos.

Esto con el objetivo de que los resultados fuesen lo más generalizables posible, además, se evitó el uso de estudios de demasiada antigüedad, contando únicamente con estudios publicados después de 2014 en adultos (10 años máximo), en niños ampliamos un poco más el rango a después de 2010 debido a la poca cantidad de estudios encontrados. De todos estos se acabó trabajando con 9 estudios en adultos y 4 en niños. Dado el pequeño número de estudios en niños, se descartó este último análisis.

Extracción de datos

La búsqueda de información fue hecha por dos revisores (ES y LD) de manera independiente y luego juntaron la información recopilada.

De esta puesta en común se realizó una extracción de información relevante por un único revisor (LD) en la cual se recopiló la siguiente información:

(1) Nombre del autor ; (2) Año de publicación; (3) Muestra; (4) Rango de edad; (5) Tipo de tarea realizada; (6) Funciones cognitivas empleadas en la tarea; (7) Grupos creados en los estudios; (8) Tipo de entrenamiento y duración; (9) Tipo de contraste fMRI; (10) Coordenadas; (11) Talairach o MNI; (12) Zonas cerebrales implicadas en el estudio.

Estimación de probabilidad de activación

La estimación de la probabilidad de activación (de inglés Activation Likelihood Estimation - ALE) es un método de metaanálisis propuesto por primera vez por Turkeltaub et al. (2002). Este método utiliza una serie de coordenadas para determinar las ubicaciones consistentes de la activación cerebral en estudios o conjuntos de datos de metaanálisis, esta metodología fue mejorada hasta dar como resultado el programa GingerALE. (Laird et al., 2005).

GingerALE, es una aplicación disponible gratuitamente con fines educativos y científicos por BrainMap (<http://brainmap.org/ale/>; Research Imaging Center of the University of Texas in San Antonio). Utiliza coordenadas de contraste (focos) compiladas a partir de diferentes estudios para generar mapas probabilísticos de activación relacionados con el dominio objetivo. En ALE, los focos de activación se consideran distribuciones de probabilidad centradas en las coordenadas informadas. Los mapas ALE se construyen después de calcular la probabilidad de que se active cada voxel espacial. Las distribuciones nulas adquiridas de los valores ALE de estudios independientes generalmente se usan para probar la confiabilidad del mapa ALE y este proceso tiene similitudes con la prueba de permutación entre experimentos. La contribución de cada estudio se pondera por el tamaño de su muestra y cada estudio se considera un efecto aleatorio. Los valores observados en la distribución ALE se comparan con la distribución nula para asignar estimaciones de probabilidad a los datos experimentales observados.

En este estudio, se trabajó en el espacio MNI. Cuando los artículos presentaban sus resultados en el espacio Talairach, estos fueron transformados al espacio MNI gracias al software de transformación implementado en la herramienta Convert Foci de GingerALE (Laird et al. 2010). Para el análisis de los mapas Ale, y utilizando GingerALE, se aplicó la corrección FWE basado en conglomerados, utilizando un umbral de $p < 0.05$ (permutado 100 veces). Cuando esta corrección proporcionó resultados nulos, se repitió el análisis aplicando una reducción del valor $p < 0.0001$. Estas dos correcciones, por su diferencia en robustez, serán distinguibles en los resultados. El análisis proporciona un mapa de valores ALE una vez aplicadas estas correcciones. Incluye solo aquellos focos que sobreviven a la corrección.

Los mapas ALE se visualizaron utilizando xjview (<https://www.alivelearn.net/xjview/> Viewing program for SPM) para extraer los clusters significativos, así como su extensión y valor ALE. Los resultados son finalmente visualizados y presentados con el software

MRICron (<https://www.nitrc.org/projects/mricron>) cross-platform NIfTI format image viewer of the University of South Carolina).

Análisis de Subgrupos

Como hemos visto en el apartado de introducción, los cambios inducidos por el ejercicio físico a nivel neuronal podrían ser influenciados tanto por características estables de ejercicio físico, como por la inclusión del ejercicio momentáneo en el diseño del estudio. Por ello, primero se llevaron a cabo los análisis en la totalidad de los estudios. Después se reagruparon siguiendo esa variable:

- Tipo AyB: Combinación de ambos tipos de temporalidades en el ejercicio físico, es decir, todos los artículos.
- Tipo A: Estudio longitudinal pre-post, los dos grupos son iguales pero un grupo hace un entrenamiento de actividad física durante el experimento y el otro no. Se compara el pre con el post (post > pre).
- Tipo B: Existe una variable intergrupal, un grupo de participantes hace ejercicio y otro no. Se comparan los dos grupos (ejercicio habitual > ejercicio no habitual).

Nos planteamos, por tanto, el efecto entre los dos diseños (A y B), es decir, ¿Es igual el ejercicio transitorio que el ejercicio sostenido? ¿Es capaz simplemente media hora de ejercicio de crear efectos cognitivos o es necesario hacer un ejercicio durante largos períodos? Aquí hemos observado la convergencia entre estudios gracias al análisis ALE.

Lista de tareas

El significado de nuestros resultados no puede obviar el tipo de tareas que se realizan en los estudios, base del análisis. Debido a esto se incluyen en la tabla del anexo 1.

Las tareas que se incluyen implican funciones de memoria (N-BACK y pares asociados en Li y cols. (2019), Wagner y cols (2017), Nishiguchi y cols (2015)), de tipo atencional visoespacial (Tarea de Eriksen y Tarea de función mayoritaria en Pensel y cols. (2018) y Shao y cols (2022)), integración visomotora (Shao y cols (2022)), funciones de control cognitivo e inhibición (Tarea Stroop y Tarea Go/No Go (Ding y cols (2021) y Wu y cols (2018)). Además, hay estudios que abordan las imágenes mentales (Wriesnegger y cols (2014)), las emociones (Tarea Hariri en Schmitt y cols (2019)) y la lectura (Shao y cols (2022)).

Los estudios tipo A incluyen 1 tarea N-Back (Li y cols (2019)), 1 tarea de Eriksen (Pensel y cols (2018)), 1 tarea de Imaginación (Wriesnegger (2014)), 1 tarea Hariri (Schmitt y cols (2019))

Los estudios tipo B incluyen 1 tarea Majority function, 1 tarea de lectura, 1 tarea de integración visomotora (Shao y cols (2022)), 1 tarea Go/NoGo (Ding y cols (2021)), 1 tarea Stroop (Wu y cols (2018))

Resultados

Resultados de la búsqueda

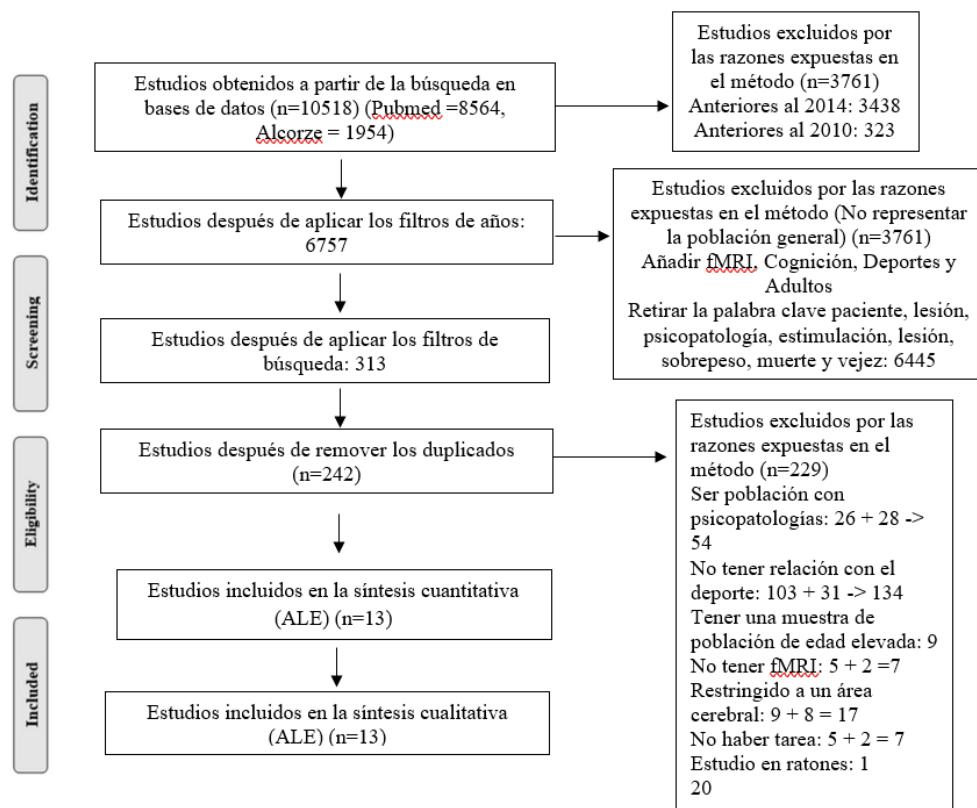
La Figura 1 muestra el proceso de selección de los artículos según el modelo PRISMA. De 8564 (adultos) y 1954 (niños) artículos procedentes de la búsqueda inicial, se aplicó un filtro de años, a partir del 2014 (5126 estudios) en adultos y a partir de 2010 (1631) en niños, una vez hecho esto se aplicaron los filtros siguientes:

Añadir las palabras: fMRI, Cognición, Deportes y Adultos

Retirar las palabras: paciente, lesión, psicopatología, estimulación, lesión, sobrepeso, muerte y vejez

Quedan 313 tras el uso de los filtros, de estos 313 se eliminaron los duplicados hasta quedar en 242 y de estos se excluyeron 229 debido a distintas razones expuestas en el diagrama (no ser estudios en humanos, ser población con lesiones o psicopatologías, no tener relación con el deporte... Quedando un total de 9 estudios en adultos y 4 estudios en niños.

Figura 1. Proceso de selección de los artículos según el modelo PRISMA



En el Anexo 1 se muestran las tareas y los resultados de localización de fMRI de cada uno de los artículos de una forma más detallada. En el Anexo 2 se muestran las interpretaciones funcionales de los resultados de los artículos.

Análisis ALE.

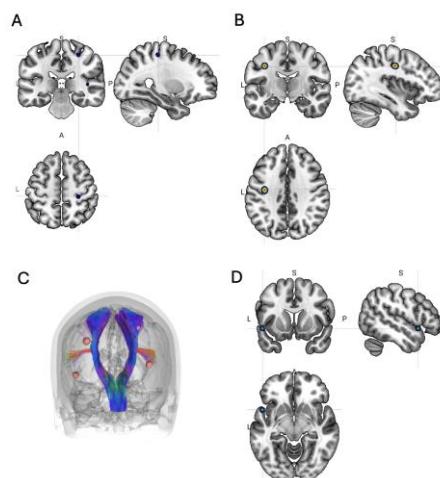
1. Todos los estudios (tipo A y B).

En los estudios de tipo AyB podemos observar clusters significativos en la sustancia blanca en los giros precentrales de ambos hemisferios y en el giro postcentral del hemisferio

derecho (asociados a áreas sensoriomotoras) (Figura 2 y Tabla 1). Además, el análisis ALE muestra un cluster en el polo temporal izquierdo, en la parte anterior del giro temporal superior. La Figura 1 muestra los tractos del circuito corticoespinal y el circuito corticobulbar. Esta sustancia blanca conectaría con las áreas sensoriomotoras indicadas más arriba.

Figura 2

Resultados del análisis ALE para la totalidad de los estudios (A y B), y tractos que conectarían los clusters en áreas de sustancia blanca.



Nota: A y B – Clusters localizados en zonas de sustancia blanca próximas áreas sensoriales y motoras (giros pre y post central respectivamente de ambos hemisferios). C – Tractos de vías piramidales que cruzan esos clusters (tractografía de template). D – Clusters en el polo temporal izquierdo.

Tabla 1. Clusters significativos en el análisis de todos los estudios (A y B).

A y B - Todos los estudios (p< 0.0001)

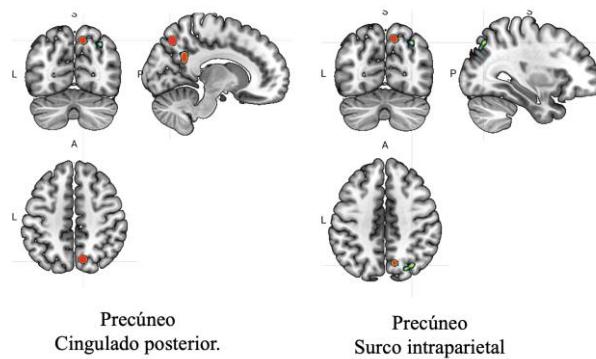
Hemisferio	Valor ALE	Extensión (vóxeles)	Área	BA	Coordenadas XYZ
HI	0.017	16	Polo Temporal	22	-51 11 -8
HI	0.017	28	Giro Precentral	4	-38 -12 38
HD	0.016	12	Giro Postcentral	3,4	28 -29 55
			Giro Precentral		

2. Estudios tipo A con ejercicio físico durante el experimento.

En cuanto a los estudios tipo A, que implican un ejercicio físico pre y post tarea experimental, se observaron activaciones claras en el precúneo y giro cingulado posterior derechos (Figura 3 y Tabla 2).

Figura 3

Resultados del análisis ALE para los estudios que incluyen un entrenamiento físico antes y después de la tarea cognitiva (estudios tipo A). Contraste post>pre.



Nota: se observan valores ALE significativos en el precúneo y giro cingulado posterior derechos.

Tabla 2. Clusters significativos en el análisis los estudios A (post>pre).

Estudios pre-post (corregidos con FWE)

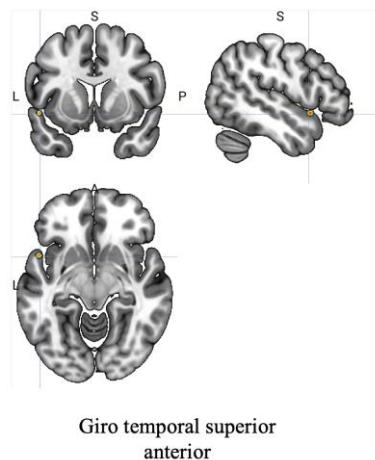
Hemisferio	Valores ALE	Extensión (vóxeles)	Área	BA	Coordenadas XYZ
HD	0.13	680 90	Precúneo Cingulado Posterior	7 31	10 -68 48

3. Estudios tipo B con ejercicio físico habitual

Por último, los estudios de tipo B en los que se comparan dos grupos (con ejercicio habitual > sin ejercicio habitual) muestran valores ALE significativos en el giro temporal superior, en su parte anterior (polo temporal; Figura 4 y Tabla 3).

Figura 4

Resultados del análisis ALE para los estudios que incluyen un contraste entre grupos (estudios tipo B). Contraste grupo con ejercicio habitual > grupo sin ejercicio habitual



Nota: se observan valores ALE significativos en polo temporal izquierdo

Tabla 3. Clusters significativos en el análisis los estudios B (ejercicio habitual>ejercicio no habitual).
Estudios de grupo (p < 0.0001)

Hemisferio	Valor ALE	Extensión (vóxeles)	Área	BA	Coordenadas XYZ
HI	0.017	56	Polo Temporal	22	-52 12 -8

Discusión

El presente estudio tenía como objetivo el metaanálisis de estudios de neuroimagen en adultos en los que se aborda el impacto cognitivo del ejercicio físico. El aspecto crucial del presente trabajo es la clasificación de los estudios, previo al metaanálisis, en estudios que usan un diseño longitudinal con ejercicio físico dentro del estudio y aquellos trabajos que adoptan un diseño de grupo donde se contrasta un grupo con ejercicio físico habitual de uno sin ejercicio físico habitual.

Atendiendo a la totalidad de los estudios, parece haber una relevancia en zonas corticales próximas a sustancia blanca que forman parte de la vía piramidal (vía vinculada con el área sensoriomotor) además, también estos muestran un efecto en el lóbulo temporal. Si bien, en las áreas sensoriomotoras hay un cambio tanto cuando las comparaciones son entre grupos como cuando el ejercicio es únicamente agudo, es a su vez importante mencionar que, si separamos el ejercicio agudo, observamos el efecto más fuerte de todo el

estudio en precúneo y cingulado posterior. Por último, si aislamos este último grupo donde simplemente se comparan cuando se hace ejercicio habitualmente y cuando no se hace entre grupo, entonces encontramos, de nuevo el área temporal anterior izquierda.

Si bien hemos realizado los contrastes de ambas agrupaciones de estudios, por desgracia, debido a la muestra de estudios tan reducida del grupo de niños los resultados no han sido tan significativos, hallando solo un valor decente en el área temporal superior anterior.

Rol de la corteza sensoriomotora y vía piramidal.

Ambas esenciales en cualquier movimiento y vinculadas con los movimientos complejos y coordinados. La corteza sensoriomotora además incluye el uso de los sentidos, estas dos características son fundamentales en la actividad física en general, tanto en la planificación de secuencias de movimientos como en la propia ejecución de estos en sí, teniendo sentido que se vean activados en nuestro estudio. En los estudios revisados, se incluyen trabajos que miden la imaginación de movimiento (Wriessnegger et al., 2014), lo cual podría estar explicando este efecto.

Rol del polo temporal

Tanto el análisis de los grupos con y sin entrenamiento habitual como el análisis de todos los estudios arrojan efectos en el polo temporal superior. Si observamos los estudios que reportan efectos en esta área observamos que son estudios que utilizan tareas de memoria, incluyendo memoria semántica (Shao et al 2022; Wagner et al., 2017; Nishiguchi, et al 2015). El polo temporal es conocido por su rol en la integración y memoria semántica amodal. Esto sería, según los presentes datos, algo que se ve influenciado tanto por el ejercicio agudo como por su práctica habitual.

Rol del precúneo

Se puede resaltar como resultado más robusto del metaanálisis las activaciones en precúneo y cingulado posterior. Esto coincide y se ve respaldado por el estudio realizado por Herbet et al. en 2019 en el cual se mostró la primera evidencia del rol del precúneo en la conciencia del cuerpo, habilidad fundamental en el ámbito del deporte y la psicomotricidad.

También puede tener una explicación en que el precúneo está involucrado en el procesamiento visoespacial y la atención, habilidades necesarias para muchos deportes vistos en el metaanálisis (golf, fútbol y tenis).

Rol del córtex cingulado posterior

El rol del córtex cingulado puede estar relacionado con la contribución de este a las funciones motoras por vías eferentes a sistemas motores subcorticales (Dum and Strick., 1990; Neafsey et al., 1990), lo cual explicaría su vínculo con el ejercicio físico y, por lo tanto, con nuestro estudio.

Por otro lado, se ha mostrado que el cingulado reacciona a caras con miedo y forma parte de la extendida red de procesamiento de caras, sirviendo para el reconocimiento de emociones propias y ajenas. El estudio de Schmitt et al. de 2019 incluía el procesamiento emocional de caras y atribuía la activación del córtex cingulado posterior a la tarea de Hariri debido a que es un área involucrada en el aspecto emocional y el comportamiento social.

Conclusión

Hemos investigado la concordancia de los trabajos que usaron la fMRI para el estudio bases neuronales subyacentes al ejercicio físico en funciones cognitivas. Se muestran efectos distintos entre el ejercicio a corto y a largo plazo. A largo plazo, se observan efectos de memoria (polo temporal), los efectos a corto plazo se relacionan más con la conciencia del propio cuerpo y las capacidades visoespaciales (precúneo y cingulado posterior derecho).

Los resultados indican que el precúneo es una región cerebral clave cuando hablamos de conciencia corporal ya que está muy vinculado a áreas sensoriomotoras del cerebro, en cuanto al procesamiento de tareas ejecutivas, la parte frontal, parietal y cingulada tienen su relevancia de distintas formas según la tarea, por ejemplo, una posible explicación de la activación del cingulado puede ser debido a las tareas de Go/NoGo, las cuales requieren del control inhibitorio de este.

Por lo tanto, la evidencia neuronal respalda el efecto del ejercicio físico sobre el rendimiento cognitivo desde la perspectiva de la neurociencia cognitiva. Es destacable que no es necesario un ejercicio físico prolongado para generar efectos en nuestra cognición y por tanto, en nuestro cerebro. Sin embargo, el ejercicio sostenido habitual tiene un impacto en funciones cognitivas de alto nivel como es la memoria semántica. Destaca sin embargo los efectos en el precúneo derecho como resultado más robusto del presente metaanálisis, eso sí restringido a los estudios que incluyeron el ejercicio dentro de su diseño.

Limitaciones

El presente trabajo está limitado por la escasa literatura existente utilizando neuroimagen funcional en población sin daño cerebral, sin deterioro cognitivo o incluso sin lesión física. Por tanto, serían deseables un mayor número de estudios en población sana adulta. Asimismo, aun cuando se efectuó búsqueda bibliográfica en población infantil, se descartó el metaanálisis en esta población dado la extremadamente escasa cantidad de estudios existentes. Es sin embargo importante el contraste de los efectos cognitivos del deporte no solamente en población enferma adulta o anciana sino también en niños.

Referencias

- Álvarez-Bueno C, Pesce C, Cavero-Redondo I, Sánchez-López M, Martínez-Hortelano JA, Martínez-Vizcaíno V. The Effect of Physical Activity Interventions on Children's Cognition and Metacognition: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, Volume 56, Issue 9, 2017, Pages 729-738, ISSN 0890-8567, <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2017.06.012>.
- Bherer L, Erickson KI, Liu-Ambrose T (2013) A review of the effects of physical activity and exercise on cognitive and brain functions in older adults. *J Aging Res* 2013:657508. <https://doi.org/10.1155/2013/657508>
- Booth FW, Roberts CK, Laye MJ. Lack of exercise is a major cause of chronic diseases. *Compr Physiol* 2012;2:1143-1211.
- Caspersen CJ, Powell KE, Christenson GM. Physical activity, exercise and physical fitness: definitions and distinctions for health related research. *Public Health Rep*. 1985; 100(2): 126-131.
- Ding Q, Huang L, Chen J, Dehghani F, Du J, Li Y, Li Q, Zhang H, Qian Z, Shen W, Yin X, Liang P. Sports Augmented Cognitive Benefits: An fMRI Study of Executive Function with Go/NoGo Task. *Neural Plast*. 2021 Dec 7;2021:7476717. doi: 10.1155/2021/7476717. Retraction in: *Neural Plast*. 2023 Dec 20;2023:9867463. doi: 10.1155/2023/9867463. PMID: 34917143; PMCID: PMC8670897.
- Dum, R. P., and Strick, P. L. (1990). Cingulate motor areas. In "The Cerebral Cortex of the Rat" (Kolb, B., and Tees, R. C., Eds.), pp. 415–442. MIT, Cambridge, MA.
- Eime R.M., Young J.A., Harvey J.T., Charity M.J., Payne W.R. A systematic review of the psychological and social benefits of participation in sport for children and adolescents: Informing development of a conceptual model of health through sport. *Int. J. Behav. Nutr. Phys. Act.* 2013;10:98. doi: 10.1186/1479-5868-10-98.

Gallardo-Gómez D, del Pozo-Cruz J, Noetel M, Álvarez-Barbosa F, Alfonso-Rosa RM, del Pozo Cruz B, Optimal dose and type of exercise to improve cognitive function in older adults: A systematic review and bayesian model-based network meta-analysis of RCTs, Ageing Research Reviews, Volume 76, 2022, 101591, ISSN 1568-1637, <https://doi.org/10.1016/j.arr.2022.101591>.

Guillaume Herbet, Anne-Laure Lemaitre, Sylvie Moritz-Gasser, Jérôme Cochereau, Hugues Duffau, The antero-dorsal precuneal cortex supports specific aspects of bodily awareness, *Brain*, Volume 142, Issue 8, August 2019, Pages 2207-2214, <https://doi.org/10.1093/brain/awz179>

Harada CN, Natelson Love MC, Triebel KL (2013) Normal cognitive aging. *Clin Geriatr Med* 29(4):737–752. <https://doi.org/10.1016/j.cger.2013.07.002>

Hillman CH, Erickson KI, Kramer AF (2008) Be smart, exercise your heart: exercise effects on brain and cognition. *Nat Rev Neurosci* 9(1):58–65. <https://doi.org/10.1038/nrn2298>

Ibarra Angulo, C. E. (2015). El deporte. *Vida Científica Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 4*, 3(5). Recuperado a partir de

<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/1970>

Joy E., Kussman A., Nattiv A. 2016 update on eating disorders in athletes: A comprehensive narrative review with a focus on clinical assessment and management. *Br. J. Sports Med.* 2016;50:154–162. doi: 10.1136/bjsports-2015-095735.

Laird, A. R., McMillan, K. M., Lancaster, J. L., Kochunov, P., Turkeltaub, P. E., Pardo, J. V., & Fox, P. T. (2005). A comparison of label-based review and ALE meta-analysis in the Stroop task. *Human brain mapping*, 25(1), 6–21.

<https://doi.org/10.1002/hbm.20129>

- Li, L., Zhang, S., Cui, J., Chen, L. Z., Wang, X., Fan, M., & Wei, G. X. (2019). Fitness-Dependent Effect of Acute Aerobic Exercise on Executive Function. *Frontiers in physiology*, 10, 902. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00902>
- Murphy MH, Blair SN, Murtagh EM. Accumulated versus continuous exercise for health benefit: a review of empirical studies. *Sports Med* 2009;39:29-43.
- Neafsey, E. J., Terreberry, R. R., Hurley, K. M., Ruit, K. G., and Frysztak, R. J. (1990). Anterior cingulate cortex in rodents: connections, visceral control functions, and implications for emotion. In “The Cerebral Cortex of the Rat” (Kolb, B., and Tees, R. C., Eds.), pp. 206–223. MIT, Cambridge, MA.
- Nishiguchi, S., Yamada, M., Tanigawa, T., Sekiyama, K., Kawagoe, T., Suzuki, M., Yoshikawa, S., Abe, N., Otsuka, Y., Nakai, R., Aoyama, T., & Tsuboyama, T. (2015). A 12-Week Physical and Cognitive Exercise Program Can Improve Cognitive Function and Neural Efficiency in Community-Dwelling Older Adults: A Randomized Controlled Trial. *Journal of the American Geriatrics Society*, 63(7), 1355–1363. <https://doi.org/10.1111/jgs.13481>
- Oja, P, Titze, S, Kokko, S, Kujala, UM, Heinonen, A, Kelly, P, Koski, P & Foster, C 2015, 'Health benefits of different sport disciplines for adults: systematic review of observational and intervention studies with metaanalysis', *British Journal of Sports Medicine*, vol. 49, no. 7, pp. 434-440. <https://doi.org/10.1136/bjsports2014-093885>
- Pensel, M.C., Daamen, M., Scheef, L. et al. Executive control processes are associated with individual fitness outcomes following regular exercise training: blood lactate profile curves and neuroimaging findings. *Sci Rep* 8, 4893 (2018).
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-23308-3>
- Rivero-Serrano, O, & Martínez, LA. (2011). La medicina actual. *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 54(2), 21-32.

Schmitt A, Martin JA, Rojas S, Vafa R, Scheef L, Strüder HK, Boecker H. Effects of low- and high-intensity exercise on emotional face processing: an fMRI face-matching study. *Soc Cogn Affect Neurosci.* 2019 Aug 7;14(6):657-665. doi: 10.1093/scan/nsz042. PMID: 31216026; PMCID: PMC6688445.

Shao X, Luo D, Zhou Y, Xiao Z, Wu J, Tan LH, Qiu S, Yuan D. Myeloarchitectonic plasticity in elite golf players' brains. *Hum Brain Mapp.* 2022 Aug 1;43(11):3461-3468. doi: 10.1002/hbm.25860. Epub 2022 Apr 14. PMID: 35420729; PMCID: PMC9248307.

Soligard T., Schwellnus M., Alonso J.M., Bahr R., Clarsen B., Dijkstra H.P., Gabbett T., Gleeson M., Hagglund M., Hutchinson M.R., et al. How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury. *Br. J. Sports Med.* 2016;50:1030–1041. doi: 10.1136/bjsports-2016-096581.

Stillman CM, Esteban-Cornejo I, Brown B et al (2020) Effects of exercise on brain and cognition across age groups and health states. *Trends Neurosci.*

<https://doi.org/10.1016/j.tins.2020.04.010>

Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., Jones, K. M., & Zeffiro, T. A. (2002). Meta-analysis of the functional neuroanatomy of single-word reading: method and validation. *NeuroImage*, 16(3 Pt 1), 765–780. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1131>

Wagner, G., Herbsleb, M., de la Cruz, F., Schumann, A., Köhler, S., Puta, C., Gabriel, H. W., Reichenbach, J. R., & Bär, K. J. (2017). Changes in fMRI activation in anterior hippocampus and motor cortex during memory retrieval after an intense exercise intervention. *Biological psychology*, 124, 65–78.

<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2017.01.003>

Wriessnegger, S. C., Steyrl, D., Koschutnig, K., & Müller-Putz, G. R. (2014). Short time sports exercise boosts motor imagery patterns: implications of mental practice in

rehabilitation programs. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 469.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00469>

Wu MT, Tang PF, Goh JOS, Chou TL, Chang YK, Hsu YC, Chen YJ, Chen NC, Tseng WI, Gau SS, Chiu MJ, Lan C. Task-Switching Performance Improvements After Tai Chi Chuan Training Are Associated With Greater Prefrontal Activation in Older Adults. *Front Aging Neurosci*. 2018 Sep 24;10:280. doi: 10.3389/fnagi.2018.00280. PMID: 30319391; PMCID: PMC6165861.

Yu, Q., Herold, F., Becker, B. et al. Cognitive benefits of exercise interventions: an fMRI activation likelihood estimation meta-analysis. *Brain Struct Funct* 226, 601–619 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02247-2>