

Variaciones de las dinámicas no lineales de las ondas gamma durante la resolución de una prueba de atención tras la aplicación de ejercicio físico

Variations in nonlinear gamma wave dynamics during the resolution of a test of attention after the application of physical exercise

*Fernando Maureira Cid, **Hernán Díaz Muñoz, ***Elizabeth Flores Ferro, ****Omar Gavotto Nogales, *****Marcelo Hadweh Briceño

*Universidad Católica Silva Henríquez (Chile), **Universidad de Santiago (Chile), ***Universidad Bernardo O'Higgins (Chile), ****Universidad de Sonora (México), *****Universidad Arturo Prat, Santiago (Chile)

Resumen. Introducción: la electroencefalografía es una útil herramienta para estudiar la asociación entre actividades motrices y las funciones cognitivas. Material y método: el objetivo de la presente investigación fue conocer los efectos de 30 minutos de ejercicio aeróbico sobre las ondas cerebrales gamma durante la resolución de una prueba de atención selectiva. La muestra estuvo constituida por 12 estudiantes universitarios (7 experimentales y 5 controles). El registro de la actividad cerebral se realizó con dispositivo cerebro-interfaz Emotiv EPOC® durante la resolución de la prueba de atención selectiva de Toulouse-Piéron realizada antes y después de 30 minutos de ejercicio físico aeróbico. Resultados: se observan variaciones en los índices de Hurst en la región prefrontal derecha e izquierda, además de la región temporal izquierda después de la realización del ejercicio físico. Las correlaciones de las regiones frontales, temporales y occipitales aumentaban o disminuían tras la intervención, pese a que los puntajes en la prueba aumentaron en todos ellos. Conclusiones: no es posible asociar un funcionamiento cerebral único con la mejora en los resultados de una prueba cognitiva tras el ejercicio físico, dando cuenta de la enorme variabilidad de las estrategias cerebrales para la resolución de un problema cognitivo.

Palabras claves: Electroencefalografía, atención, ejercicio aeróbico, ondas gamma, matemática no lineal

Abstract. Introduction: Electroencephalography is a useful tool for studying the association between motor activities and cognitive functions. Material and method: the aim of this research was to know the effects of 30 minutes of aerobic exercise on gamma brain waves during the resolution of a selective attention test. The sample consisted of 12 university students (7 experimental and 5 controls). The recording of brain activity was performed with brain-interface device Emotiv EPOC® during the resolution of the Toulouse-Piéron selective care test conducted before and after 30 minutes of aerobic physical exercise. Results: variations in Hurst indices are observed in the right and left prefrontal region, in addition to the left temporal region after physical exercise. The correlations of the frontal, temporal and occipital region increased or decreased after the intervention, although the scores on the test increased in all of them. Conclusions: it is not possible to associate a single brain function with the improvement in the results of a cognitive test after physical exercise, realizing the enormous variability of brain strategies for solving a cognitive problem.

Keywords: Electroencephalography, attention, aerobic exercise, gamma, no lineal mathematics.

Introducción

La electroencefalografía (EEG) es una técnica que permite estudiar la actividad eléctrica de la corteza cerebral gracias a electrodos ubicados en el cuero cabelludo. Hans Berger realizó los primeros registros de EEG en seres humanos en 1929, difundiendo su uso al diagnóstico clínico y al estudio básico de la actividad cerebral (Maureira, 2016b). Actualmente se sabe que la EEG entrega información eléctrica que puede ser clasificada en cinco tipos de ondas cerebrales: a) Delta, que corresponde a frecuencias de 1,5 a 3,5 Hertz (Hz) y que están asociadas a las etapas de sueño profundo; b) Theta, con frecuencias de 3,5 a 8 Hz y que se observan preferentemente durante el sueño ligero; c) Alfa, con frecuencias de 8 a 12 Hz y que se asocia con un estado de vigilia relajado con los ojos cerrados; d) Beta, con frecuencias de 13 a 30 Hz y que se observa durante los estados perceptivos y de resolución de problemas cognitivos; e) Gamma, con frecuencias mayores a 30 Hz y asociadas a estados de meditación, autoconciencia y estados elevados de procesos cognitivos (Maureira, 2018).

En la última década se ha utilizado la EEG en estudios sobre movimiento, imaginación motriz y efectos del ejercicio

físico sobre la actividad eléctrica cerebral. Machado, Dos Santos, Teixeira, Do Vale, Cagy, De Sá, et al. (2016) y Machado, Dos Santos, Teixeira, Do Vale, Moreira, Cagy, et al. (2016) evaluaron las ondas cerebrales beta y gamma en 15 personas de 24±1,2 años, durante la realización de una flexo-extensión del dedo índice de la mano derecha frente a un estímulo en la pantalla de un computador. Esta actividad se realizó antes y después de la inmovilización de la mano derecha de los participantes durante 48 horas. Los resultados muestran un aumento de las ondas beta en los electrodos Fp2, C3 y P4 y una disminución en C4, tras la inmovilización. Esto se explica por una menor participación de la corteza motora contralateral en la planificación del movimiento. En relación con gamma, se muestra un aumento de la potencia de esta banda en los electrodos F3, F4, Fz, C3, C4 y Cz, lo cual se explica por una alteración de la red neuronal que permite la unión de la planificación y ejecución del movimiento.

Un estudio de Almanza, Llamas, Guevara y Hernández (2014) mostró correlación de las ondas gamma prefrontal-parietal derecha durante cinco minutos de observación de un videojuego, por parte de jugadores expertos de videojuegos (7 horas semanales de práctica durante los últimos 2 años) en relación con sujetos sin experiencias en este tipo de juegos. Los autores atribuyen este acoplamiento prefrontal-parietal derecho a la práctica continua de videojuegos. En una investigación de Fry, Vogt y Folland (2014) se observó un aumento de la onda gamma en la corte-

za sensoriomotora durante la contracción isométrica de los cuádriceps en 15 hombres de 24 ± 5 años. Se concluye que gamma participa en procesos de anticipación y ejecución de tareas motrices. En otro estudio de Infarinato, Marzano, Iacoboni, Aschieri, Lizio, Soricelli, et al. (2011) observaron que las ondas alfa de 18 karatecas (con los ojos abiertos) presentaron menores amplitudes en regiones frontales, centrales y occipitales que en los sujetos no atletas. Los autores concluyen que los cerebros de deportistas poseen una actividad alfa reducida con los ojos abiertos, debido a una reactividad cortical menor que sujetos controles.

Por otra parte, en las últimas décadas, la matemática del caos o dinámica de sistemas complejos ha ido permeando diversas áreas de conocimiento como la meteorología, hidrología, economía, ingeniería, biología, etc. En esta última ha tenido un gran impacto en el estudio de la actividad cardíaca y el sistema nervioso (Barrat, Barthelemy y Vespignani, 2008). Si bien, la matemática del caos muestra la dependencia de los sistemas complejos a sus condiciones iniciales y las mínimas variaciones en el tiempo 1 pueden provocar enormes cambios en el tiempo 2, haciendo imposible la predicción de la evolución de estos sistemas (Pikovsky, Rosenblum & Kurths, 2001), existen herramientas para tratar de entender estos sistemas, entre ellas el exponente de Hurst (H) que muestra la relación entre orden/caos en la actividad de un sistema durante series temporales (Kale & Butar, 2011). Este índice oscila entre 0 y 1, donde valores $0.5 < H < 1.0$ es un indicador de comportamiento persistente o de memoria de largo plazo del sistema, es decir, que la actividad futura del sistema será similar a la actividad pasada. Un valor $H=0.5$ es indicativo de un comportamiento aleatorio, siendo imposible predecir el futuro del sistema. Valores $0 \leq H < 0.5$ indica un comportamiento antipersistente o sin memoria de largo plazo, es decir, el sistema tendrá un comportamiento futuro opuesto a la actividad pasada (Díaz, Maureira & Córdova, 2017).

A través de un análisis de la secuencia oscilatoria realizado a distintas escalas temporales (análisis reescalado), es posible determinar cuál es la tendencia más probable que seguirán los datos en el futuro, y de esta manera inferir si en el procesamiento cerebral que subyace a la manifestación eléctrica observable del EEG, existe una tendencia al orden (procesos constructivos), al caos (procesos destructivos), o a la estabilidad en torno a un valor de tendencia central (Buzsaki, 2006). Más allá de las variaciones de intensidad que pueden obedecer a causas variadas y encontrar correlatos múltiples, el índice de Hurst captura la esencia operativa de los procesos que subyacen a la manifestación eléctrica de la actividad cerebral y permiten evaluar el grado de organización/desorganización de áreas del cerebro potencialmente implicadas en la preparación o ejecución, de tareas o estados conductuales-cognitivos (Díaz, Maureira, Cohen, Córdova, Palominos, Otárola, et al., 2015).

Existen pocos trabajos que estudien la actividad cerebral durante la resolución de pruebas cognitivas que sean analizados mediante matemáticas no lineales (Díaz, Córdova, Cañete, Palominos, Cifuentes, Sánchez, et al., 2015; Díaz, et al., 2015; Díaz, Maureira, Córdova y Palominos, 2017). Díaz, Maureira, Flores y Córdova (2018) estudiaron las correlaciones inter e intra-hemisféricas de los índices de Hurst (H)

durante la imaginación de una coreografía por parte de bailarines profesionales, mostrando una relación positiva entre la corteza prefrontal derecha e izquierda. Un estudio de Flores, Maureira, Díaz, Navarro, Gavotto y Matheu (2019) revela que el ejercicio físico aeróbico no mostró efectos importantes sobre las ondas beta de la corteza prefrontal, temporal y occipital, pero sí modificaciones importantes en las correlaciones de los índices H de estas regiones.

Con base en los antecedentes mencionados es que surge el objetivo de la presente investigación: conocer los efectos de 30 minutos de ejercicio aeróbico sobre las ondas cerebrales gamma de estudiantes universitarios durante la resolución de una prueba de atención selectiva. La razón de estudiar las ondas gamma es porque se asocian a la resolución de problemas, a la memoria, al proceso de aprendizaje y a estados atencionales tanto en niños como adultos (Kandel et al., 2001). Por otra parte, la atención selectiva es un proceso caracterizado por la focalización y selección de estímulos desestimando otros (Estévez, García y Junque, 1997) que depende de estructuras cerebrales como el pulvinar en los ganglios basales, la corteza frontal, corteza temporal inferior, corteza orbitofrontal, corteza parietal y corteza occipital (Maureira y Flores, 2016). Con este estudio se espera indagar sobre la influencia del ejercicio físico sobre la relación orden/caos en la actividad cerebral, entregando una nueva mirada sobre la neurofisiología basada en la teoría de sistemas dinámicos complejos.

Metodología

Muestra

Se trabajó con una muestra no probabilística intencionada, constituida por 12 estudiantes de la carrera de pedagogía en Educación Física de la Universidad Católica Silva Henríquez de Santiago de Chile. Todos son varones diestros con $19,2 \pm 1,2$ años y ninguno de ellos presentaba lesiones que le impidieran realizar ejercicio físico o alteraciones cognitivas por lo menos un año antes de las evaluaciones. La presente investigación fue aprobada por el comité de ética de la Universidad Católica Silva Henríquez. Todos los participantes firmaron un consentimiento informado.

Instrumentos

Para el registro EEG se utilizó el dispositivo cerebro-interfaz Emotiv EPOC® con frecuencia de muestreo de 128 Hz. El EEG registra 14 canales a través de electrodos posicionados según el sistema 10/20 (Fig. 1) usando como referencia los electrodos del hueso mastoides. Este dispositivo resulta ser tan eficiente y válido como el Neurosky MindWave de utilización clínica (Maskeliunas, Damasevicius, Martisius y Vasiljevas, 2016). Los datos del EEG fueron procesados con el programa EEGLAB y ADJUST ejecutados en la plataforma MATLAB 2008. Para la presente investigación se utilizaron los registros del lóbulo prefrontal (AF3 y AF4), temporal (T7 y T8) y occipital (O1 y O2). Se analizó el rango de frecuencia de 30 a 64 Hz (onda gamma).

Para la evaluación de la atención selectiva se utilizó la prueba de Toulouse-Piéron, la cual consta de una matriz de 30 columnas x 40 filas de signos, entre los cuales hay que identificar los que sean iguales a las figuras de referencia. La

corrección de la prueba corresponde al Índice Global de Atención y Percepción (IGAP) que se obtiene restando la suma de errores y omisiones al total de aciertos. La aplicación de la prueba se realizó en forma individual, con una duración de dos minutos.

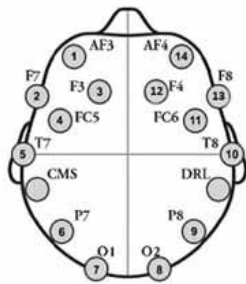


Figura 1. Ubicación de los electrodos del Emotiv Epoc® durante el estudio.

Procedimiento

Siete estudiantes fueron asignados al grupo experimental y cinco al grupo control. Una semana antes de la primera evaluación cada participante recibió indicaciones sobre no consumir bebidas con alcohol, ni energizantes, así como dormir mínimo ocho horas para lograr un descanso apropiado. Todos los participantes presentaban una práctica regular de actividad física igual o menor a tres horas semanales fuera de sus clases universitarias. Las mediciones se realizaron durante los meses de mayo-agosto en el laboratorio de Neurofisiología, Ejercicio Físico y Teoría del Caos de la Universidad Católica Silva Henríquez de Chile. En la primera medición se registró la frecuencia cardíaca basal de cada participante durante cinco minutos. Tras esto, cada participante debía resolver la prueba de atención de Toulouse-Piéron mientras se registraba su actividad cerebral con el EEG durante 2 minutos.

Una semana después se volvió a registrar la frecuencia cardíaca en reposo de cada participante. El grupo control volvió a realizar la prueba de atención mientras se volvía a registrar su actividad cerebral con el EEG. Se esperó una semana para la segunda medición, ya que según la curva del olvido de Ebbinghaus (1885, citado en Salisbury, 1990) tras 6-7 días se recuerda menos del 10% del contenido experimentado, situación fundamental en pruebas neuropsicológicas, para evitar la memorizar o aprendizaje de las pruebas. Durante esta semana todos los participantes siguieron las mismas indicaciones que antes de la primera medición.

Por su parte, los integrantes del grupo experimental realizaron un trabajo aeróbico de 30 minutos de trote en un treadmill BHF1 serie F, con una intensidad entre el 60% y 75% de la frecuencia cardíaca máxima, obtenida con la fórmula de Karvonen: $(FC_{\text{máx}} - FC_r) \% \text{ de trabajo} + FC_r$; donde $FC_{\text{máx}}$ es la frecuencia cardíaca máxima y FC_r es la frecuencia cardíaca de reposo (Willmore y Costill, 2004). Esto se controló con un dispositivo pectoral de medición de FC modelo Polar T31-CODED. Una vez finalizada la intervención se esperó a que los participantes volvieran a su frecuencia cardíaca de reposo (entre 5 y 7 minutos) y nuevamente resolvieron la prueba de atención de Toulouse-Piéron mientras se registraba su actividad cerebral con el EEG.

Todas las mediciones se realizaron durante la mañana (entre 10:00 y 12:00 hrs.) los días martes y jueves.

Análisis de datos

Para el registro y análisis de datos del electroencefalograma se utilizó el programa Matlab con la herramienta EEGlab. Posteriormente se calcularon los índices de Hurst cada un segundo de registro, obteniendo 120 índices de H (la prueba dura 120 segundos) y luego se obtiene el promedio de estos 120 valores. Esto se realizó para el electrodo AF3, AF4, T7, T8, O1 y O2. Tras esto se utilizó el programa estadístico SPSS 24.0 para Windows, aplicando pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (KS) obteniendo $p > .05$ en todos los índices H, razón por la cual se utilizó estadística paramétrica. Para comparar la actividad cerebral pre y post intervención se aplicaron pruebas t para muestras relacionadas y para estudiar las relaciones entre las regiones cerebrales evaluadas se utilizaron correlaciones de Pearson. Se consideraron significativos valores $p < .05$

Resultados

En la figura 2 se observan las medias de los índices de Hurst en la onda gamma de la corteza prefrontal de los 12 sujetos evaluados (los cinco primeros sujetos corresponden a los controles y del seis al 12 a los experimentales). En todos los casos los valores H fluctúan entre .193 y .278 lo que muestra una dinámica antipersistente. En la región prefrontal izquierda (AF3) se observa que dos estudiantes del grupo control (40%) presentaron una disminución del índice H en la segunda medición (Sujeto 3: $t=2.285$; $gl=108$; $p=.024$; $d=.37$; Sujeto 4: $t=6.079$; $gl=115$; $p=.000$; $d=.87$), en tanto, en el grupo experimental existió una variación en seis de los siete evaluados (86%), en cuatro estudiantes se presenta una disminución del índice H tras el ejercicio (Sujeto 6: $t=2.099$; $gl=118$; $p=.038$; $d=.29$; Sujeto 7: $t=3.335$; $gl=117$; $p=.001$; $d=.40$; Sujeto 8: $t=8.132$; $gl=118$; $p=.000$; $d=.87$; Sujeto 9: $t=3.636$; $gl=118$; $p=.000$; $d=.50$) y en dos se produce un aumento de H (Sujeto 11: $t=-4.185$; $gl=112$; $p=.000$; $d=.50$; Sujeto 12: $t=-13.721$; $gl=113$; $p=.000$; $d=1.55$).

En relación con la región prefrontal derecha (AF4) el grupo control presenta solo un sujeto (20%) con un aumento del índice H en la segunda medición (Sujeto 5: $t=-2.319$; $gl=113$; $p=.022$; $d=.30$). En cambio, el grupo experimental presenta variaciones en cinco evaluados (71%) con una disminución de H en dos de ellos (Sujeto 7: $t=2.429$; $gl=117$; $p=.017$; $d=.30$; Sujeto 9: $t=4.061$; $gl=118$; $p=.000$; $d=.52$) y un aumento del índice H tras el ejercicio de tres estudiantes (Sujeto 10: $t=-2.169$; $gl=117$; $p=.032$; $d=.32$; Sujeto 11: $t=-4.387$; $gl=112$; $p=.000$; $d=.46$; Sujeto 12: $t=-11.892$; $gl=113$; $p=.000$; $d=1.36$).

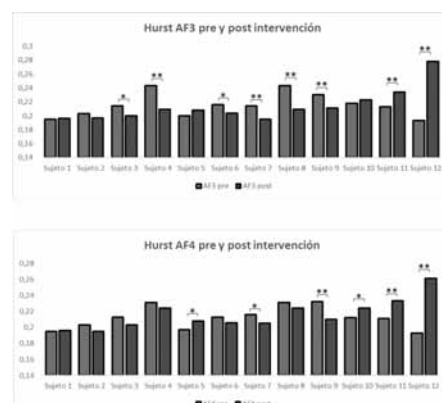


Figura 2. Índices de Hurst de la actividad prefrontal izquierda (AF3) y derecha (AF4) antes y después de la intervención de ejercicio físico aeróbico.

En la figura 3 se muestran las medias de los índices de Hurst en la onda gamma la corteza temporal de toda la muestra. En todos los casos los valores fluctúan entre .190 y .280 de manera similar que en la corteza prefrontal. En la región temporal izquierda (T7) se observa que en tres estudiantes del grupo control (60%) existen variaciones de H en la segunda medición (Sujeto 2: $t=3.300$; $gl=92$; $p=.001$; $d=.49$; Sujeto 4: $t=10.131$; $gl=115$; $p=.000$; $d=1.60$; Sujeto 5: $t=-4.268$; $gl=113$; $p=.000$; $d=.54$). En el grupo experimental cinco sujetos presentaron variaciones de H (71%), en cuatro de ellos se produjo una disminución (Sujeto 7: $t=6.297$; $gl=117$; $p=.000$; $d=.97$; Sujeto 8: $t=6.389$; $gl=118$; $p=.000$; $d=1.60$; Sujeto 10: $t=4.539$; $gl=117$; $p=.000$; $d=.67$; Sujeto 11: $t=5.145$; $gl=112$; $p=.000$; $d=.79$) y en uno el índice H aumento (Sujeto 9: $t=-5.209$; $gl=118$; $p=.000$; $d=.69$).

En relación con la región temporal derecha (T8) solo se observa un aumento de H en dos sujetos del grupo experimental (Sujeto 11: $t=-4.454$; $gl=112$; $p=.000$; $d=.55$; Sujeto 12: $t=-10.321$; $gl=113$; $p=.000$; $d=1.27$).

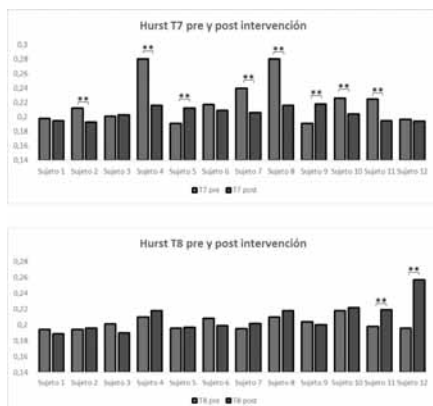


Figura 3. Índices de Hurst de la actividad temporal izquierda (T7) y derecha (T8) antes y después de la intervención de ejercicio físico aeróbico.

[En la figura 4 se muestran las medias de los índices de Hurst en la onda gamma de la corteza occipital de toda la muestra. En todos los casos los valores fluctúan entre .184 y .277. En la región occipital izquierda (O1) se observa que solo en tres estudiantes del grupo experimental (44%) existen variaciones de H en la segunda medición (Sujeto 9: $t=2.351$; $gl=118$; $p=.020$; $d=.32$; Sujeto 10: $t=2.433$; $gl=117$; $p=.017$; $d=.33$; Sujeto 12: $t=-15.350$; $gl=113$; $p=.000$; $d=1.65$).

En relación con la región occipital derecha (O2) solo se observa un aumento de H en dos sujetos del grupo experimental (Sujeto 7: $t=-7.879$; $gl=117$; $p=.000$; $d=.86$; Sujeto 12: $t=-5.501$; $gl=113$; $p=.000$; $d=.74$).

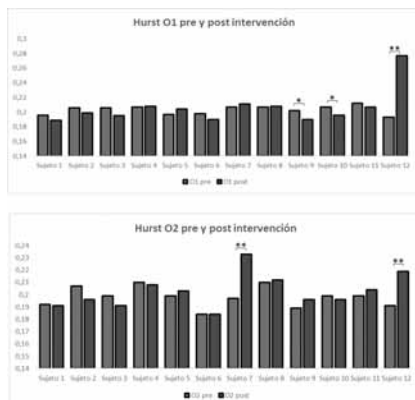


Figura 4. Índices de Hurst de la actividad occipital izquierda (O1) y derecha (O2) antes y después de la intervención de ejercicio físico aeróbico.

En la figura 5 y 6 se muestran las correlaciones significativas entre las medias de los índices de Hurst de las ondas gamma de las seis regiones cerebrales estudiadas. Cuatro de los cinco sujetos del grupo control (80%) presentan variaciones entre las dos mediciones, uno de ellos aumenta el número de correlaciones (sujeto 2), otro mantiene el número de correlaciones, pero aumenta la intensidad de ellas (sujeto 1) y dos sujetos disminuyen el número de correlaciones (sujeto 3 y 5). En el grupo experimental, cuatro de los siete sujetos (57%) presentan variaciones de las correlaciones tras la intervención, en tres de ellos se observa un aumento del número de relaciones entre diversas regiones cerebrales (sujeto 6, 8 y 9) y uno presenta una disminución del número de correlaciones (sujeto 12).

El número de correlaciones no está asociado a los resultados en la prueba de atención (IGAP), ya que todos los sujetos mejoraron sus puntuaciones, independientes de que algunos hayan aumentado, disminuido o no presentasen variaciones en el número de correlaciones entre las seis regiones estudiadas.

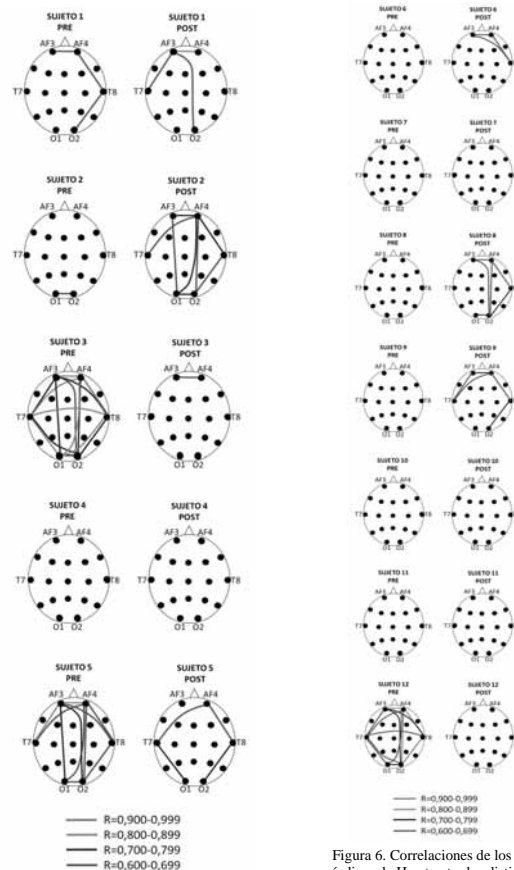


Figura 5. Correlaciones de los índices de Hurst entre las distintas regiones cerebrales en la primera y segunda medición del grupo control.

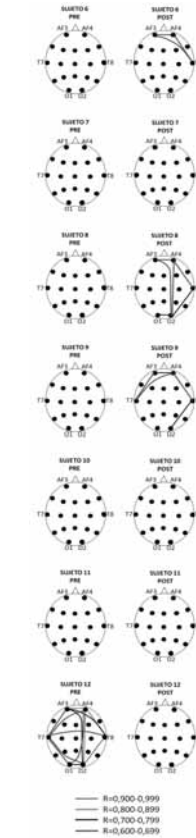


Figura 6. Correlaciones de los índices de Hurst entre las distintas regiones cerebrales en las mediciones pre y post intervención del grupo experimental.

Discusión

La literatura muestra variados estudios que revelan los efectos positivos del ejercicio físico sobre las funciones cognitivas (Chuang, Hung, Huang, Chang & Hung, 2015; De Bruin, van del Zwan & Bögels, 2016; Hawkes, Manselle & Woollacott, 2014; Hsieh, Chang, Fang & Hung, 2016; Maureira, Palma, Medina, Segueida, Valenzuela & Flores, 2019; Orozco, Anaya, Vite & García, 2016; Rosa, García & Carrillo, 2019; Tsukamoto, Suga, Takenaka, Tanaka, Takeuchi,

Hamaoka, et al., 2016; etc.), pero aún no se ha asociado esto a la actividad eléctrica cerebral, orientándose más al flujo sanguíneo o consumo de glucosa por neuronas de ciertas regiones cerebrales (Maureira, 2016a).

Siguiendo esa línea, la presente investigación reveló que los índices de Hurst de las ondas gamma (>30 Hz) de la corteza prefrontal, temporal y occipital durante la resolución de una prueba de atención pre y post-intervención presentan valores $H < 0.5$ lo cual indica que durante este proceso la dinámica cerebral corresponde a un sistema de memoria de corto plazo, es decir, la actividad pasada será opuesta a la que presentará el sistema a futuro. Esta situación es similar a la encontrada por Flores, et al. (2019) con las ondas beta, pero en dicha investigación se observaron diferencias significativas en el grupo experimental en la corteza temporal derecha.

Los índices de Hurst de las ondas gamma en la corteza prefrontal del grupo control variaron en dos sujetos para AF3 y en uno para AF4 y se mantuvieron estables en los demás, pese a que todos ellos mejoraron en su desempeño de la prueba de atención selectiva. En el grupo experimental las modificaciones se observaron en seis estudiantes para AF3 y en cinco para AF4, pese a que igualmente todo el grupo mejoró su desempeño en la prueba. Esto da cuenta que el ejercicio físico aeróbico no estimula de la misma forma la actividad neurofisiológica ordenada/caótica en diversos sujetos, ya que con o sin intervención aeróbica el cerebro humano posee una enorme variabilidad de estrategias para resolver un problema y lograr un objetivo, ya que la región prefrontal relacionada con la atención, razonamiento, pensamiento, lenguaje, etc. (Kandel, Schwartz y Jessell, 2001) puede aumentar, disminuir o mantenerse inalterable en distintos sujetos tras la actividad física y aun así todos ellos mejoran sus resultados. Pese a esto, en la presente investigación es posible evidenciar que un número mayor de estudiantes presenta modificaciones en su relación orden/caos en la actividad eléctrica cerebral prefrontal tras el ejercicio físico, sin que esto sea determinante en la mejora de los resultados de la prueba de atención selectiva.

En la región temporal se aprecia una clara asimetría entre T7 y T8, siendo la primera, la que presenta una mayor variabilidad de H en la segunda medición (grupo control) o tras la intervención (grupo experimental). La región temporal se asocia con la audición, la memoria y emociones como la ira y el placer (Bear, Connors & Paradiso, 2016) y en particular la región izquierda, se relaciona con el lenguaje y la capacidad matemática (Crossman y Neary, 2011), lo cual podría sufrir modificaciones neurofisiológicas tratando de resolver de mejor forma la prueba de atención, situación que no ocurre con la región temporal derecha.

La región occipital fue la que presentó menos modificaciones en los índices H de las ondas gamma tras el ejercicio físico, esto puede ser explicado porque esta área se encarga del procesamiento visual, actividad que pudo realizarse de manera similar en la primera y segunda medición, con una estrategia uniforme en ambas ocasiones para la resolución de la prueba de atención.

Las correlaciones entre las seis regiones estudiadas varían entre cada sujeto evaluado, en algunos casos aumenta, en otros disminuye y otros no presentan modificaciones en

el número de correlaciones, pero en toda la muestra los resultados de la prueba de atención mejoran. También es posible notar que en la mayoría de los evaluados el número de correlaciones es bajo, lo que se podría explicar porque las tareas mentales producen desincronización cerebral para asignar recursos a procesamiento más específicos para resolver el problema (Díaz, Maureira, Córdova, y Palominos, 2017).

Conclusiones

Los índices de Hurst de las ondas gamma de la corteza prefrontal izquierda y derecha, y de la corteza temporal izquierda aumentan o disminuyen durante la resolución de una prueba de atención selectiva tras una intervención de 30 minutos de ejercicio aeróbico, sin poder establecer una asociación con la mejora en los puntajes de la evaluación. Esto da cuenta de la enorme variabilidad de las estrategias cerebrales para la resolución de un problema cognitivo, en tanto algunos cerebros aumentan su orden otros lo disminuyen o incluso no presentan variaciones, pero todos mejoran en la ejecución de una tarea mental. Esta situación es igual cuando se analiza el número de correlaciones de los índices H de las ondas gamma entre la corteza prefrontal, temporal y occipital, donde tampoco es posible asociar una estrategia de aumento o disminución de coordinación entre diversas regiones a una mejora en la ejecución de la prueba de atención.

Son necesarias más investigaciones de la actividad eléctrica cerebral durante la realización de pruebas cognitivas de atención, planificación, flexibilidad mental, etc. e indagar sobre los efectos del ejercicio físico sobre la relación orden/caos de dicha actividad eléctrica, como una forma alternativa de buscar una explicación a las mejoras cognitivas producidas por la práctica de actividad física. También sería necesaria ampliar los rangos etarios utilizados e incluir muestras de damas, además de explorar con diferentes intensidades de trabajo físico.

Referencias

- Almanza, M., Llamas, J., Guevara, M. & Hernández, M. (2014). Increased prefrontal-parietal EEG Gamma band correlation during motor imagery in expert video game players. *Actualidades en Psicología*, 28(117), 26-35. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/ap.v28i117.14095>
- Barrat, A., Barthelemy, M. & Vespignani, A. (2008). *Dynamical processes on complex networks*. New York: Cambridge University Press.
- Bear, M., Connors, B. & Paradiso, M. (2016). *Neurociencia, la exploración del cerebro*. Madrid: Wolters Kluwer.
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the brain*. London: Oxford University Press.
- Chuang, L., Hung, H., Huang, C., Chang, Y. & Hung, T. (2015). A 3-month intervention of Dance Dance Revolution improves interference control in elderly females: a preliminary investigation. *Exp Brain Res*, 233(4), 1181-1188. doi: <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4196-x>
- Crossman, A. & Neary, D. (2011). *Neuroanatomía*. Barcelona: Elsevier Masson.
- De Bruin, E., van del Zwan, J. & Bögels, S. (2016). A RCT

- comparing daily mindfulness meditations, biofeedback exercises, and daily physical exercise on attention control, executive functioning, mindful awareness, selfcompassion, and worrying in stressed young adults. *Mindfulness*, 7(5), 1182-1192. doi: <https://doi.org/10.1007/s12671-016-0561-5>
- Díaz, H., Córdova, F., Cañete, L., Palominos, F., Cifuentes, F., Sánchez, C., et al., (2015). Order and chaos in the brain: fractal time series analysis of the EEG activity during a cognitive problem solving task. *Procedia Computer Science*, 55, 1410-1419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.135>
- Díaz, H., Maureira, F., Cohen, E., Córdova, F., Palominos, F., Otárola, J., et al. (2015). Individual differences in the order/chaos balance of the brain self-organization. *Annals of Data Science*, 2(4), 421-438. doi: <https://doi.org/10.1007/s40745-015-0051-y>
- Díaz, H., Maureira, F. & Córdova, F. (2017). Temporal scaling and inter-individual hemispheric asymmetry of chaos estimation from EEG time series. *Procedia Computer Science*, 122, 339-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.378>
- Díaz, H., Maureira, F., Córdova, F. & Palominos, F. (2017). Long-range linear correlation and nonlinear chaos estimation differentially characterizes functional connectivity and organization of the brain EEG. *Procedia Computer Science*, 122, 857-864. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.447>
- Díaz, H., Maureira, F., Flores, E. & Córdova, F. (2018). Intra e inter-hemispheric correlation of the order/chaos fluctuation in the brain activity during a motor imagination task. *Procedia Computer Science*, 139, 456-463. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.250>
- Estévez, A., García, C. & Junque, C. (1997). La atención: una compleja función cerebral. *Rev Neurología*, 25, 1989-1997.
- Flores, F., Maureira, F., Díaz, H., Navarro, B., Gavotto, O. y Matheu, A. (2019). Efectos de una sesión de ejercicio físico sobre la actividad neurofisiológica durante la resolución de una prueba de atención selectiva. *Retos*, 36, 390-396.
- Fry, A., Vogt, T. & Folland, J. (2014). Does sensorimotor cortex activity change with quadriceps femoris torque output? A human electroencephalography study. *Neuroscience*, 275, 540-548. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.06.044>
- Hawkes, T., Manselle, W. & Woollacott, M. (2014). Crosssectional comparison of executive attention function in normally aging long-term tai chi, meditation, and aerobic fitness practitioners versus sedentary adults. *J Altern Complement Med*, 20(3), 178-184. doi: <https://doi.org/10.1089/acm.2013.0266>
- Hseih, S., Chang, Y., Fang, C. & Hung, T. (2016). Acute resistance exercise facilitates attention control in adult males without an age-moderating effect. *Journal Sport Exercise Psychology*, 38(3), 247-254. doi: <https://doi.org/10.1123/jsep.2015-0282>
- Infarinato, P., Marzano, N., Iacoboni, M., Aschieri, P., Lizio, R., Soricelli, A., et al. (2011). Reactivity of alpha rhythms to eyes opening is lower in athletes than non-athletes: A high-resolution EEG study. *International Journal of Psychophysiology*, 82(3), 240-247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.09.005>
- Kale, M. & Butar, F. (2011). Fractal analysis of time series and distribution properties of Hurst exponent. *Journal of Mathematical Sciences and Mathematics Education*, 5, 8-19.
- Kandel, E., Schwartz & Jessell, T. (2001). *Principios de neurociencia*: México DF: McGraw-Hill.
- Machado, D., Dos Santos, J., Teixeira, S., Do Vale, V., Moreira, R., Cagy, M., et al. (2016). Involvement of beta absolute power in motor areas after hand immobilization: An EEG study. *MedicalExpress*, 3(5), M160503. doi: <http://www.dx.doi.org/10.5935/MedicalExpress.2016.05.03>
- Machado, D., Dos Santos, J., Teixeira, S., Do Vale, V., Cagy, M., De Sá, A., et al. (2016). Gamma absolute power reveals activation of motor areas after hand immobilization. *MedicalExpress*, 3(5), M160504. doi: <http://dx.doi.org/10.5935/MedicalExpress.2016.05.04>
- Maskeliunas, R., Damasevicius, R., Martisius, I. & Vasiljevas, M. (2016). Consumer-grade EEG devices: are they usable for control tasks? *PeerJ*, 4, e1746. Doi: <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.1746>
- Maureira, F. (2016a). Plasticidad sináptica, BDNF y ejercicio físico. *EmásF, Revista Digital de Educación Física*, 7(40), 51-63.
- Maureira, F. (2016b). *¿Qué es la inteligencia?* Madrid: Bubok Publishing.
- Maureira, F. (2018). *Principios de neuroeducación física*. Madrid: Bubok Publishing.
- Maureira, F. & Flores, E. (2016). *Principios de neuropsicobiología*. Valencia: Obrapropia.
- Maureira, F., Palma, E., Medina, R., Segueida, A., Valenzuela, L. y Flores, E. (2019). Incidencia de la antropometría, práctica de actividad física, estilos de aprendizaje, motivos, actitudes y estrategias de aprendizaje sobre el rendimiento académico de estudiantes de Santiago de Chile. *Retos*, 36, 497-502.
- Orozco, G., Anaya, M., Vite, J. & García, M. (2016). Cognición, actividades de la vida diaria y variables psicológicas en mujeres adultas mayores practicantes de Tai Chi Chuan. *Retos*, 30, 222-225.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M. & Kurths, J. (2001). *Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rosa, A., García, E. & Carrillo, P. (2019). Relación entre capacidad aeróbica y el nivel de atención en escolares de primaria. *Retos*, 35, 36-41.
- Salisbury, D. (1990). Cognitive psychology and its implications for designing drill and practice programs for computers. *Journal of Computer-Based Instruction*, 17(1), 23-30.
- Tsukamoto, H., Suga, T., Takenaka, S., Tanaka, D., Takeuchi, T., Hamaoka, T., et al. (2016). Greater impact of acute highintensity interval exercise on post-exercise executive function compared to moderate-intensity continuous exercise. *Physiol Behav*, 155, 224-230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.12.021>
- Wilmore, J. & Costill, D. (2004). *Fisiología del esfuerzo y del deporte*. Barcelona: Paidotribo.