

# Electroencefalografía en reposo y el desarrollo de las funciones ejecutivas durante la adolescencia\*

## Resting-State Electroencephalography and Executive Functions Development Through Adolescence

Recibido: 17 Julio 2024 | Aceptado: 18 Diciembre 2024

DIEGO ARMANDO LEÓN-RODRÍGUEZ<sup>a</sup>

Universidad Externado de Colombia, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9694-7044>

ADRIANA MARTÍNEZ-MARTÍNEZ

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6342-0342>

OSCAR MAURICIO AGUILAR-MEJÍA

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8189-8286>

### RESUMEN

La adolescencia es una etapa del ciclo vital caracterizada por cambios cerebrales y por el desarrollo progresivo de las funciones ejecutivas. Asimismo, es una etapa de riesgo para desarrollar problemas de salud mental, especialmente si no se cuenta con un repertorio ejecutivo que permita afrontar adecuadamente las demandas del entorno. En este contexto, se propone una herramienta de uso clínico basada en el cúmulo de conocimientos sobre la electroencefalografía en estado de reposo (EEG-ER) y su relación con las funciones ejecutivas. Usando EEG-ER se obtienen tres índices de conectividad funcional: (1) asimetría frontal alfa; (2) radio entre ondas lentas y rápidas; y (3) acoplamiento en fase de amplitud. Estos índices representan cambios en la organización funcional del cerebro adolescente y su correlación con procesos psicológicos. En conclusión, se presenta evidencia del EEG-ER como complemento diagnóstico y como medida de la efectividad de intervenciones clínicas. Además, se propone su uso como herramienta para detectar patrones de actividad que anteceden a procesos psicopatológicos.

### Palabras clave

electroencefalografía en reposo; funciones ejecutivas; maduración cerebral; conectividad funcional; adolescentes.

<sup>a</sup>Autor de correspondencia. Correo electrónico: [diego.leon4@uexternado.edu.co](mailto:diego.leon4@uexternado.edu.co)

### ABSTRACT

Adolescence is a developmental stage characterized by significant brain changes and the progressive maturation of executive functions. It is also a period of increased vulnerability to mental health problems, particularly when adolescents lack executive skills to cope with environmental demands. In this context, we propose a clinically applicable tool grounded in accumulated knowledge on resting-state electroencephalography (EEG-RS) and its relationship with executive functions. EEG-RS provides three reliable measures of functional connectivity representing changes in organization of the adolescent brain and its association with behavioral difficulties: (1) frontal alpha asymmetry; (2) the slow-

Para citar este artículo: León-Rodríguez, D. A., Martínez-Martínez, A.M., & Aguilar-Mejía, O. M. (2025). Electroencefalografía en reposo y el desarrollo de las funciones ejecutivas durante la adolescencia. *Universitas Psychologica*, 24, 1-18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy24.erdf>

to-fast wave ratio; and 3) phase-amplitude coupling. These indices reflect changes in the functional organization of the adolescent brain and its correlation with psychological processes. In conclusion, EEG-RS is a diagnostic complement and a measure of clinical intervention effectiveness. Additionally, it is proposed as a tool to detect patterns of brain activity that may precede the onset of psychopathological processes.

**Keywords**

resting-state EEG; executive functions; brain development; functional connectivity; adolescents.

El análisis del electroencefalograma durante el estado de reposo (EEG-ER) ha cobrado gran interés durante la última década, ya que permite cuantificar la organización funcional del encéfalo (Candelaria-Cook et al., 2022). Esta técnica ha resultado ser confiable para el estudio de las variables psicológicas como las tendencias afectivas, los rasgos de personalidad, las habilidades emocionales y las capacidades intelectuales (Das et al., 2022; Shim et al., 2018; Zhang et al., 2020). Por tanto, el EEG-ER emerge como una medida complementaria a las mediciones comportamentales, aumentando la precisión y validez en la evaluación psicológica (Meghdadi et al., 2021).

Se ha evidenciado que, durante el neurodesarrollo, los cambios en el EEG-ER están asociados con procesos de maduración cerebral, como cambios en la mielinización y la densidad sináptica. Estos procesos coinciden con mejores desempeños en funciones ejecutivas (FE) durante la niñez y la adolescencia (Candelaria-Cook et al., 2022). En consecuencia, el EEG-ER constituye un método con utilidad en medicina preventiva, ya que permite identificar componentes transdiagnósticos que subyacen a las fases iniciales de los problemas de conducta, trastornos mentales y demencias (Sargent et al., 2021). Además, puede ser usado para validar la efectividad de las intervenciones conductuales, al ofrecer una medida objetiva y confiable de los cambios neurofuncionales durante y después de las intervenciones (Schwartzmann et al., 2023).

Las características del EEG-ER cambian a través del ciclo vital, reflejando los cambios en la organización estructural y funcional del

sistema nervioso durante momentos sensibles del desarrollo humano. En la adolescencia, se produce una reorganización de las redes cerebrales; por lo tanto, durante este periodo ocurren cambios importantes en la actividad espontánea del cerebro, las cuales determinarán las trayectorias de desarrollo de las habilidades psicológicas en la adultez (Blakemore & Choudhury, 2006; Foulkes & Blakemore, 2016). Por lo anterior, el objetivo de este artículo es describir los principales cambios en el EEG-ER relacionados con el desarrollo del funcionamiento ejecutivo a lo largo de la adolescencia. Esta descripción permitirá identificar qué medidas del EEG-ER pueden usarse como biomarcadores del desarrollo saludable e indicadores de trayectorias vitales problemáticas, caracterizadas por dificultades en el control de la conducta y la cognición.

## **El electroencefalograma en estado de reposo (EEG-ER)**

El EEG-ER es un registro no invasivo de la actividad sincrónica de grupos neuronales durante un periodo en el que el sujeto está despierto, pero sin realizar una tarea específica. Aunque existe una amplia variedad de protocolos para su aplicación, la mayoría consisten en registrar entre uno y cinco minutos de actividad, tanto con los ojos abiertos y como cerrados (Chung et al., 2022). Se estima que las mediciones resultantes reflejan la arquitectura estructural y funcional de las redes cerebrales, sirviendo como correlato neurofisiológico de rasgos o predisposiciones psicológicas (Popov et al., 2023). En este contexto, el EEG-ER se emplea como complemento de los registros cerebrales evocados por estímulos cognitivos, afectivos o sociales, también obtenidos mediante electroencefalografía, tales como las oscilaciones relacionadas con eventos (*event-related oscillations*, EROs), y los potenciales relacionados con eventos (*event-related potentials*, ERPs). Asimismo, puede integrarse con otras técnicas como la resonancia magnética funcional (*functional magnetic resonance imaging*, fMRI),

para estudiar las variaciones psicofisiológicas asociadas a los funcionamientos psicológicos normales y patológicos (Das et al., 2022).

### Principales oscilaciones en el EEG-ER y su significado funcional

El EEG-ER se analiza a través del análisis espectral, que consiste en calcular la amplitud o el poder de determinados rangos de frecuencias de la onda registrada en cada uno de los sensores puestos sobre el cuero cabelludo. Las convenciones para agrupar las oscilaciones en bandas de frecuencia pueden variar; sin embargo, las más usadas son 1) las ondas delta ( $\delta$ ), que oscilan entre 0.5 y 3.5 Hz y las ondas theta ( $\theta$ ) que oscilan entre 4 y 8 Hz, también conocidas como ondas lentas (*slow waves*, SW); y 2) las ondas alfa ( $\alpha$ ) con oscilaciones entre 8 y 12 Hz; beta ( $\beta$ ), entre 13 y 30 Hz; y gamma ( $\gamma$ ), con oscilaciones entre 30 y 80 Hz, también conocidas como ondas rápidas (*fast waves*, FW) (De Pascalis et al., 2020).

Se asume que cada oscilación refleja la actividad sincrónica de redes neuronales, por lo que cada red tiene una frecuencia espontánea característica, detectable durante los estados de reposo. En este sentido, cuando no se está realizando una tarea particular, las redes subcorticales suelen mostrar oscilaciones lentas (delta y theta); mientras que los circuitos de mayor complejidad oscilan en frecuencias más altas. Por ejemplo, el ritmo alfa reflejaría la actividad talamocortical y el ritmo beta la actividad corticocortical (Schutter & Knyazev, 2012).

Se sabe que la amplitud del ritmo delta incrementa cuando se realizan tareas relacionadas con la detección de estímulos, la toma de decisiones, la atención y el direccionamiento hacia metas, por lo que suele observarse una reducción en la amplitud de este ritmo durante el reposo con ojos cerrados. Como mecanismo neurobiológico, se ha propuesto que el aumento de las bajas frecuencias durante tareas con carga cognitiva obedece a un incremento en la actividad inhibitoria de las interneuronas de

redes subcorticales, lo que permitiría reducir la interferencia proveniente de señales irrelevantes para la tarea (Knyazev, 2012). Dado lo anterior, la dificultad para mantener la baja amplitud del ritmo delta durante el reposo ha sido considerada un correlato neural de problemas en el control atencional y en la toma de decisiones (Karamacoska et al., 2018; Schwartzmann et al., 2023).

Por otro lado, el ritmo theta en reposo ha sido vinculado con la plasticidad cerebral, principalmente con la formación de nuevas memorias, el aprendizaje de habilidades y el desarrollo del lenguaje, con una posible fuente subcortical localizada en regiones del lóbulo temporal medial (Lum et al., 2022). Por tal razón, las anomalías en este ritmo suelen considerarse como indicadores de fallas en la consolidación de la memoria.

Con respecto al ritmo alfa, este tiene un mayor poder durante el EEG-ER con ojos cerrados y se ha asociado principalmente con la actividad en regiones cerebrales posteriores. Se estima que, en este estado, la mayor fuente del ritmo alfa es talámica, con una sincronización progresiva que se extiende desde las cortezas occipitales y parietales hacia las temporales y frontales. Esto ha llevado a plantear que, en reposo con ojos cerrados, se activa una red global talamocortical y corticotálamica.

Estos hallazgos han llevado a pensar que el ritmo alfa espontáneo tiene un papel importante en modular la actividad cerebral, facilitando el procesamiento de señales relevantes y promoviendo un funcionamiento cerebral más eficiente (Ott et al., 2021). Esta hipótesis es fortalecida por estudios que muestran la correlación positiva entre la amplitud del ritmo alfa y mayores puntajes en pruebas de coeficiente intelectual, solución de problemas y teoría de la mente (Howsley & Levita, 2018).

Además de los análisis espectrales de los ritmos convencionales, también es posible extraer medidas complementarias a través del análisis matemático avanzado del EEG-ER. Los índices más usados son: (1) la relación entre un mismo ritmo registrado en diferentes regiones, tal como es la asimetría frontal en la banda alfa (*frontal*

*alpha asymmetry*, FAA); (2) la relación entre ritmos registrados en la misma región, tales como la correlación entre las bandas  $\alpha$  y  $\delta$ , el radio entre ondas lentas y rápidas (SW/FW), y el acoplamiento entre frecuencias, donde sobresale el acoplamiento en fase de la amplitud (*phase-amplitude coupling*, PAC); (3) el análisis de microestados del EEG; (4) el análisis de poder basado en la fuente; y (5) los análisis de conectividad funcional, entre los cuales sobresalen la coherencia, el índice de fase-lag y la probabilidad de sincronización (Anderson & Perone, 2018; De Pascalis et al., 2020; Popov et al., 2023).

Uno de los índices del EEG-ER más usados es la asimetría hemisférica, en especial la FAA, que se calcula restando el logaritmo natural del ritmo alfa de los electrodos frontales derechos menos los izquierdos [ $\ln(F4) - \ln(F3)$ ]. De acuerdo con el modelo de aproximación/evitación, una mayor actividad en la corteza prefrontal (CPF) izquierda indica una tendencia hacia la aproximación, mientras que una mayor actividad frontal derecha se vincula con las conductas de evitación. Como la actividad alfa es inversamente proporcional a la actividad cortical, una FAA negativa es un indicador de una mayor actividad en la CPF izquierda, lo cual se correlaciona con una mayor frecuencia de conductas dirigidas a metas, rasgos de extroversión y afecto positivo (Briesemeister et al., 2013).

Por el contrario, valores positivos en la FAA podrían indicar hipofuncionalidad de la CPF izquierda sobre la derecha, lo que se interpreta como una menor cantidad de conductas, mayor ansiedad, pérdida del placer y afecto negativo (Smith et al., 2017). Asimismo, una menor FAA en adultos se ha vinculado con un mejor desempeño en las funciones ejecutivas como la planificación y el control inhibitorio (Çiçek & Nalçac, 2001). Esta relación es consistente con el uso de la alta FAA como posible biomarcador de síntomas de depresión (Feldmann et al., 2018). Sin embargo, los resultados aún son controversiales y parecen indicar una relación más compleja (van der Vinne et al., 2017).

Igualmente, los radios SW/FW (delta/beta y theta/beta) se han usado como indicadores de control ejecutivo atencional y emocional. Un mayor radio SW/FW en áreas frontales se ha interpretado como un indicador de regulación ejercida por las redes prefrontales sobre la actividad de los circuitos subcorticales (Putman et al., 2010). En este sentido, una alta correlación SW/FW se ha asociado con fallas en la modulación descendente de las tendencias motivacionales involuntarias originadas en los centros límbicos, lo que puede contribuir a problemas de conducta en la niñez y la adolescencia, así como a trastornos mentales en la adultez.

Este fenómeno se explica por el hecho de que la actividad neuronal de baja frecuencia regula el intercambio de información entre regiones del cerebro modulando la amplitud de las oscilaciones de alta frecuencia. Por estos motivos, este radio ha sido propuesto como un biomarcador de control cognitivo y emocional (Putman, 2011). En términos concretos, el radio SW/FW ha tenido fuerte influencia en ámbitos clínicos, ya que se ha consolidado como un biomarcador sólido para apoyar el diagnóstico del trastorno por déficit de atención e hiperactividad (TDAH) (Forbes et al., 2022). Este radio también se usa durante el entrenamiento con neurofeedback, en los que las personas aprenden a disminuirlo a través del uso de videojuegos controlados por algoritmos que transforman las señales de EEG en acciones significativas para los jugadores.

El tercer tipo de índice calculado con EEG-ER es el acoplamiento en fase de la amplitud (*phase-amplitude coupling*, PAC). Se basa en la hipótesis de que la actividad oscilatoria cerebral es jerárquica; es decir, la fase de las oscilaciones más lentas modula la amplitud, frecuencia o fase de las oscilaciones más rápidas (Sacks et al., 2021). Este análisis describe la interacción entre actividades oscilatorias de regiones cerebrales distantes, donde la fisiología de una de ellas restringe o influye sobre la fisiología de otras, lo que conforma una red nerviosa que soporta la emergencia de funciones cognitivas, afectivas y de control ejecutivo (Sacks et al., 2021).

## Cambios en el EEG-ER a través de la adolescencia

La adolescencia es un periodo de alta neuroplasticidad y gran sensibilidad ambiental, lo que favorece el remodelamiento de diversas redes neuronales y configurando una ventana de oportunidad para el desarrollo de habilidades emocionales, sociales y de control ejecutivo (Blakemore & Choudhury, 2006; Fuhrmann et al., 2015). Este cambio en la arquitectura encefálica puede observarse en variaciones en el EEG-ER.

Durante la adolescencia ocurre una reducción continua en el poder espectral en las bandas de baja frecuencia, acompañada de un aumento en el poder de las altas frecuencias. Este patrón inicia en la niñez en las regiones posteriores y se acentúa durante la adolescencia en la región prefrontal (Howsley & Levita, 2018). Dichos cambios se reflejan en una reducción de los radios SW/FW, que estaría asociado con procesos como la poda sináptica, la reducción de sustancia gris, ajustes en procesos de neurotransmisión, el incremento de la sustancia blanca, la reorganización funcional y una mayor eficiencia de los circuitos cerebrales para el control cognitivo, en particular, la red ejecutiva central (*central executive network*, CEN) (Candelaria-Cook et al., 2022).

En análisis con magnetoencefalografía (MEG) se demostró que la reducción en la banda delta ocurría principalmente en regiones de asociación como la CPF medial, así como un menor acople en fase de estas oscilaciones lentas entre las regiones prefrontales y límbicas. Esta reducción en la comunicación a bajas frecuencias se ve compensada por un aumento de la actividad en frecuencias beta, especialmente en regiones como la corteza cingulada posterior.

Con respecto al ritmo alfa, el poder de este ritmo refleja una U invertida, con un incremento durante la niñez hasta alcanzar un pico de 10 Hz durante la adolescencia temprana, seguido por una reducción progresiva hasta llegar a un patrón estable en la adultez. La U invertida está asociada con patrones complejos de reorganización cerebral hacia la consolidación

de circuitos no locales más eficientes (Howsley & Levita, 2018; Popov et al., 2023).

En cuanto a la conectividad funcional, se ha planteado que los procesos de segregación e integración estructuran la arquitectura cerebral en redes neuronales especializadas en procesar la información necesaria para el surgimiento de funciones psicológicas (Li et al., 2024). La segregación se refiere al fortalecimiento de las conexiones dentro de una red neuronal, mientras se debilitan conexiones con nodos de otras redes, promoviendo un funcionamiento altamente especializado, diferenciándola de otras. La integración se entiende como la capacidad de una red para transmitir e integrar información distribuida entre sus componentes.

Durante la adolescencia se han identificado ciclos de poda sináptica en los circuitos locales, así como mielinización entre nodos de las redes no locales, lo que reduce la comunicación a corta distancia a costa de una mayor conexión entre regiones lejanas. Este proceso ha llevado a afirmar que, durante la adolescencia, ocurre una segregación progresiva de redes altamente distribuidas, integradas y especializadas para responder eficientemente a las demandas del ambiente (Anderson & Perone, 2018; Chung et al., 2022).

Por ejemplo, un estudio con MEG evidenció que la creciente conectividad funcional en bandas alfa y beta se debía al aumento de conexiones no locales, las cuales permiten conformar redes distribuidas capaces de sincronizarse en frecuencias más rápidas, aumentando el poder global en estas frecuencias (Meng & Xiang, 2016).

Durante el reposo, se ha observado que, en la adolescencia, ocurre una creciente segregación dentro de las regiones que conforman la red por defecto (*default mode network*, DMN), la red ejecutiva central (*central executive network*, CEN), la red de control inhibitorio (cíngulo-opercular) y la red de control emocional (frontolímbica) (Anderson & Perone, 2018). También se ha hallado una reducción significativa en los niveles de integración funcional dentro de estas redes durante el reposo.

El aumento de la segregación y la disminución de la integración durante el reposo se considera una característica típica de una red neuronal eficiente y especializada en el procesamiento de señales específicas, ya que dicha red aumentaría su integración solo durante el procesamiento de información durante una tarea específica. Fallas o demoras en la adquisición de estos patrones de segregación e integración medidos durante el reposo han sido identificados en adolescentes con trastornos atencionales, del aprendizaje, del estado de ánimo y ansiedad (Baum et al., 2017; Jones & Astle, 2022).

### **Conceptualización de las funciones ejecutivas y su desarrollo a través de la adolescencia**

Las funciones ejecutivas (FE) han sido un concepto difícil de definir, ya que agrupa múltiples habilidades cognitivas superiores que son necesarias para lograr un objetivo y adaptarse a situaciones nuevas. En la actualidad, se considera que las FE son todas aquellas habilidades cognitivas como la memoria de trabajo, el control inhibitorio, la flexibilidad cognitiva, la planeación, el razonamiento y la resolución de problemas. Estas funciones nos permiten comprender conceptos abstractos, resolver problemas a los que nunca nos habíamos enfrentado, planear, manejar nuestras relaciones sociales, resistir a impulsos, tomar el tiempo para pensar antes de actuar y estar concentrados en la actividad que se está realizando (Cristofori et al., 2019; Diamond, 2013). Anatómicamente, las FE han sido asociadas con la CPF; no obstante, hoy en día se reconoce que dependen de una red funcional más amplia y compleja que va más allá de las áreas prefrontales (Zelazo, 2020).

La CPF es conocida como la zona cerebral que madura más lentamente. En este contexto, la maduración se refiere a la formación de circuitos cerebrales eficientes como respuesta a las demandas del ambiente. Como resultado, algunas áreas continúan desarrollándose a través de la adolescencia e incluso la adultez. Esto se relaciona con el hecho de que las FE son

las últimas funciones mentales en alcanzar su total desarrollo y expresión en los individuos. Durante la infancia y la adolescencia, las FE están continuamente mejorando. Durante el primer año, la habilidad de inhibir conductas sobreaprendidas es desarrollada, lo que permite un incremento progresivo en su capacidad atencional en el ambiente. Habilidades como la planificación y el cambio conductual emergen hacia los tres años, con mejoras significativas hacia los siete años. Por su parte, la habilidad para inhibir información irrelevante durante una tarea se consolida entre los seis y los diez años (Zelazo, 2020).

Existe evidencia de que el rendimiento en tareas de control inhibitorio, velocidad de procesamiento, memoria de trabajo y toma de decisiones continúa desarrollándose durante la adolescencia. Por ejemplo, se han observado mejorías en atención selectiva, memoria de trabajo y resolución de problemas durante esta etapa. También hay evidencia de un desarrollo no lineal, con rendimientos más bajos en ciertas tareas de funciones ejecutivas durante la adolescencia tardía en comparación con la adolescencia temprana o media, lo cual podría explicarse por procesos de reorganización neural (Cristofori et al., 2019). De esta forma, en la adolescencia la mayoría de las FE mejoran o se estabilizan, mientras que unas pocas pueden mostrar un leve declive (Cristofori et al., 2019).

La caracterización funcional de estos procesos evidencia que el desarrollo de las FE es jerárquico. En este modelo, primero deben desarrollarse habilidades básicas como la memoria de trabajo y los mecanismos de inhibición, que luego darán paso al desarrollo de otras habilidades ejecutivas más complejas, como la planeación y la resolución de problemas (Müller & Kerns, 2015). De esta forma, el desarrollo de las FE debe ser considerado en el contexto de un amplio rango de cambios que ocurren principalmente en la niñez; resaltando que el desarrollo de estas habilidades se verá influenciado por variables ambientales como el lenguaje, el bilingüismo, el entrenamiento cognitivo, la exposición a eventos estresantes, los estilos de crianza, entre otros (Zelazo, 2020).

## Relación entre el EEG-ER y el funcionamiento ejecutivo en adolescentes

### *Funcionamiento ejecutivo en la adolescencia y el poder espectral en el EEG-ER*

Los estudios en EEG-ER en grupos etarios han proporcionado indicadores objetivos de los cambios funcionales esperados en los circuitos cerebrales. Específicamente, en adolescentes, las desviaciones en el patrón de poder espectral esperado se han relacionado con problemas en el desarrollo de las FE y con la aparición de problemas de conducta y de psicopatologías. La reducción en el poder de las bandas lentas tiene un papel importante con la ganancia del autocontrol durante la adolescencia, especialmente en regiones anteriores, y se correlaciona con la maduración funcional de la CPF. De este modo, un alto poder delta o theta anterior coincide con la hipofunción de la CPF y con dificultades en el control ejecutivo (Nettinga et al., 2023).

Este elevado poder en oscilaciones lentas puede ser producto de condiciones adversas tempranas. Por ejemplo, Rommel et al. (2017) demostraron que adolescentes con nacimiento pretérmino presentan mayor poder delta y más problemas de control atencional. Este mismo patrón de ondas lentas y bajo control ejecutivo fue observado en adolescentes que crecieron en orfanatos (Hevia-Orozco et al., 2018) y en aquellos que han vivido en condiciones de vulnerabilidad psicosocial (Lanfranco et al., 2023).

Estos patrones disfuncionales podrían ser los responsables de algunos de los síntomas observados en adolescentes con algún tipo de psicopatología. En este sentido, adolescentes con diagnóstico de depresión y con alto poder delta y theta en la CPF suelen presentar dificultades para discriminar rostros positivos y una mayor cantidad de afecto negativo (Auerbach et al., 2015). En una revisión sistemática, este mayor poder en bandas lentas frontales fue asociado con dificultades en el desarrollo de la red por

defecto (*default mode network*, DMN), lo cual podría limitar un adecuado control emocional, incrementando el dolor psicológico y el riesgo de conductas suicidas (Amico et al., 2023).

Con respecto a la banda alfa, su menor poder se ha relacionado con dificultades en la adquisición de habilidades sociales y del control motor (Neuhaus et al., 2021; 2023). Esta disfunción podría deberse a una deficiencia en el desarrollo de sinapsis inhibitorias, lo que reduciría la actividad de las señales eferentes y dificultaría la inhibición de conductas involuntarias e inadecuadas durante las interacciones sociales (Neo et al., 2023).

Otras desviaciones respecto de los patrones normales en el poder espectral, como bajo poder delta y alto theta y alfa, fueron características en adolescentes con diagnóstico de depresión mayor que presentaban deficiencias moderadas a severas en el control emocional y de los pensamientos intrusivos (Najafabadi & Bagh, 2023). Asimismo, se reportó un alto poder alfa y beta en regiones parietales derechas en jóvenes con menor control atencional (Tortella-Feliu et al., 2014). Todo esto resalta la importancia de la maduración de los patrones de poder espectral del EEG-ER en etapas previas (niñez y preadolescencia) y durante la adolescencia, en las cuales patrones de actividad cerebral diferentes a los esperados pueden ser indicadores de disfunción ejecutiva y de un alto riesgo para el desarrollo de problemas de salud mental.

### *Funcionamiento ejecutivo en la adolescencia y la asimetría frontal alfa (FAA)*

Un estudio reciente evidenció que la FAA en reposo crece y se estabiliza a lo largo de la adolescencia hasta alcanzar un patrón adulto, caracterizado por una lateralidad acentuada hacia la izquierda. Este patrón se ha asociado con un mejor uso de las FE, en especial, el control inhibitorio (Nettinga et al., 2023). Estos resultados indicarían la presencia de una conexión inhibitoria local en la CPF y la excitatoria entre las CPF de ambos hemisferios y las regiones subcorticales, lo que subyace al

uso eficiente del control ejecutivo durante las exigencias del entorno.

En este sentido, el desbalance en el desarrollo de la FAA se ha vinculado con dificultades en el funcionamiento intelectual y emocional, lo cual conlleva un mayor desajuste ante las demandas cotidianas. Diversos estudios han encontrado que adolescentes con diagnóstico de depresión, quienes suelen presentar un mayor poder en banda alfa en regiones frontales derechas con respecto a las izquierdas, presentan más problemas en el control inhibitorio de pensamientos y conductas indeseables, en el uso de estrategias de regulación emocional, en la flexibilidad cognitiva y en la planificación (Amico et al., 2023; Çiçek & Nalçac, 2001; Meiers et al., 2020; Meza-Cervera et al., 2023; Pössel et al., 2008).

Estos hallazgos han resultado controversiales cuando se tiene en cuenta el modelo clásico aproximación/evitación de la CPF y los resultados obtenidos en adolescentes sin diagnóstico (Ambrosini & Vallesi, 2016; Smith et al., 2017). En primer lugar, el aumento de la FAA derecha indicaría una hipofunción de la CPF derecha y no de la izquierda, lo que contradice la propuesta de que el malestar emocional y las conductas de evitación surgen por una hipoactividad de la CPF izquierda.

En segundo lugar, las pocas diferencias significativas en la FAA entre los casos con diagnóstico de depresión mayor y los controles sin diagnóstico dificultan la interpretación del papel de la FAA en el funcionamiento psicológico anómalo o patológico, e impide usar este índice como biomarcador confiable para el diagnóstico de depresión o ansiedad (Grünewald et al., 2018). Estas incongruencias han llevado al replanteamiento del modelo, sugiriendo que el poder alfa puede provenir de diferentes fuentes corticales y subcorticales, que se desarrollan de forma local o no local a lo largo de la adolescencia para facilitar el control ejecutivo (Brzezička et al., 2017). Desviaciones en estos patrones de desarrollo podrían dar lugar, al menos, a tres perfiles:

(1) Mayor FAA derecha en pacientes con depresión y con problemas en el funcionamiento ejecutivo, quienes estarían en mayor riesgo de suicidio. Esto se debería a una desviación considerable en el desarrollo cerebral, producto de la exposición crónica a experiencias adversas durante la niñez, como depresión materna, el maltrato, la institucionalización o la pobreza extrema (Hevia-Orozco et al., 2018; Meiers et al., 2020; Tomarken et al., 2004).

(2) Mayor FFA izquierda y peor funcionamiento ejecutivo en adolescentes sin diagnóstico de depresión, quienes suelen presentar mayor afecto negativo, ansiedad e impulsividad (Feldmann et al., 2018).

(3) Ausencia de FFA en adolescentes sin diagnóstico, quienes pueden mostrar algunas dificultades en tareas ejecutivas, pero responden adecuadamente al entrenamiento de estas habilidades, en la medida que logran madurar o estabilizar la FAA (Feldmann et al., 2018).

#### *Radio ondas lentas sobre ondas rápidas SW/FW*

Durante la adolescencia, en el EEG-ER suele observarse una reducción de los ritmos lentos (delta y theta) y un incremento del poder beta (ritmo rápido). Este cambio es importante para una mejor detección de señales externas durante las tareas que requieren control cognitivo (Meng & Xiang, 2016). Putman et al. (2010) hallaron que un mayor radio delta/beta era indicador de menor control atencional e inhibitorio, mientras que una mayor coherencia theta/beta se asociaba con un mayor control en tareas de carga atencional. Otros estudios han confirmado la estrecha relación entre un bajo radio theta/beta y un mejor desempeño en tareas ejecutivas como el control atencional, la flexibilidad cognitiva, la toma de decisiones, la fluidez verbal, la metacognición, la memoria de trabajo y el control del afecto negativo (Putman et al., 2014).

Alteraciones en el neurodesarrollo pueden resultar en un mayor poder de los ritmos lentos en regiones prefrontales y parietales, lo que conduciría a un mayor radio SW/FW en adultos y adolescentes con diagnóstico de TDAH,



caracterizados por fallas significativas en tareas de control ejecutivo (Galiana-Simal et al., 2020; Galicia-Alvarado et al., 2016). Por ejemplo, un radio theta/beta más elevado se ha relacionado con mayor cantidad de síntomas de inatención y dificultades en la planificación y toma de decisiones en adolescentes diagnosticados con TDAH (Zhang et al., 2017). En congruencia con estos hallazgos, consistentes en niños y adolescentes diagnosticados con TDAH, la Administración de Drogas y Alimentos de Estados Unidos (*Food and Drug Administration, FDA*) ha avalado el uso del radio theta/beta como un biomarcador complementario para el diagnóstico de TDAH (Arns et al., 2012).

En la misma línea, se ha observado que los fármacos psicoestimulantes pueden reducir el radio SW/FW, lo que coincide con una mejoría en el control ejecutivo en pacientes con diagnóstico de TDAH. Esto ha llevado a discutir si este radio es un indicador del control ejecutivo o de la activación, en tanto que los problemas ejecutivos en los casos de TDAH con alto radio podrían ser causados por una hipoactivación de la CPF, la cual sería compensada transitoriamente con el uso de psicoestimulantes (Clarke et al., 2019).

Además, se ha investigado si el entrenamiento cognitivo en FE, y el neurofeedback aplicado sobre el radio SW/FW, tienen efecto en la disminución de los síntomas de TDAH y en la mejora del desempeño en tareas de control ejecutivo. No obstante, los resultados han sido poco satisfactorios y controversiales (van Son et al., 2018; 2020; Zhang et al., 2023).

Una discusión relacionada es si el radio SW/FW es un indicador general de control ejecutivo o si se asocia específicamente con el control atencional. Evidencias recientes apoyan la idea de que la reducción de este radio en regiones prefrontales está específicamente relacionada con el control atencional, y no con otras formas de control ejecutivo. Así, un radio theta/beta elevado estaría presente únicamente en los casos con predominio de inatención, y no de otros problemas de la conducta o del neurodesarrollo (Clark et al., 2022; Kobayashi et al., 2020; Tabiee et al., 2023).

Esto podría indicar que dicho índice está más asociado con la activación de la red CEN, y no tanto con la funcionalidad de la red cíngulo-opercular, implicada en la inhibición de las conductas indeseadas (van Son et al., 2018). Todo esto ha llevado a plantear que el radio theta/beta podría emplearse para una mejor clasificación de subgrupos dentro del TDAH, permitiendo discriminar los casos específicos con alteraciones en el control atencional (Herrera-Morales et al., 2023).

### *Acoplamiento en fase-amplitud (PAC)*

El acoplamiento en fase-amplitud (*phase-amplitude coupling, PAC*) es una de las principales técnicas utilizadas para estudiar la relación entre las diferentes frecuencias de oscilaciones neurales dentro o entre regiones cerebrales (Sacks, Schwenn, Boyes et al., 2023). Algunos estudios han reportado que el PAC entre diferentes frecuencias se vincula al funcionamiento ejecutivo durante la adolescencia. Por ejemplo, Sacks, Schwenn, De Regt et al. (2023) reportaron correlaciones positivas entre: PAC izquierdos theta/beta y el malestar psicológico, PAC alfa/beta izquierdo y los problemas atencionales, y PAC izquierdo alfa/beta y los problemas de memoria.

En un reciente estudio longitudinal con adolescentes entre los 12 y 15 años, se reportó una disminución progresiva con la edad en el PAC theta/beta en el hemisferio derecho asociado con mayor malestar psicológico. A su vez, una disminución en este mismo PAC en el hemisferio izquierdo se correlacionó con un menor bienestar emocional (Sacks et al., 2023).

Estos resultados indicarían que la reducción del PAC es un indicador confiable de los mecanismos de neuromodulación necesarios para sustentar el desarrollo de las FE. Por lo tanto, aquellos adolescentes que no logran reducir el PAC entre ondas lentas y rápidas, principalmente en el hemisferio izquierdo, presentarían más dificultades para desarrollar habilidades de control ejecutivo (Sacks et al., 2021).

### *Conectividad funcional (CFU) y posibles implicaciones*

El patrón de reorganización en la CFU, caracterizado por una progresiva segregación local e integración no local, se ha propuesto como uno de los procesos del neurodesarrollo necesarios para la conformación de sistemas cerebrales como la redes DMN, CEN, cíngulo-opercular y frontolímbica. Estas redes subyacen a la adquisición de FE, tales como la mentalización, el control atencional, la inhibición y el control emocional (Chung et al., 2022).

Por ejemplo, se ha reportado la disminución en la CFU en la banda delta para las redes DMN y CEN, lo cual se considera un cambio necesario para el desarrollo de habilidades de regulación emocional, inhibición conductual y control atencional; la integración gradual en banda alfa en estas redes frontotemporales, asociada con el desarrollo de las habilidades de memoria semántica (Chung et al., 2022); y la reducción de la conectividad efectiva en todas las bandas para las conexiones caudales-anteriores que componen las redes CEN y DMN, involucradas en el desarrollo de habilidades sociales y control cognitivo (Machinskaya et al., 2019).

Además, la correcta adquisición de FE durante la adolescencia dependería de la disminución de la CFU en las bandas lentas y el aumento en las rápidas. Por ejemplo, una menor sincronía frontotemporal en la banda theta se correlaciona con un mayor control emocional y conductual; menor sincronía delta frontoparietal coincide con un mejor control atencional; mientras que el incremento de la sincronía beta frontoparietal se asocia con una mejoría significativa en las tareas de mentalización (Marek et al., 2018).

Cambios en este patrón de neurodesarrollo y su correlato funcional pueden indicar dificultades, y por lo tanto, mayor riesgo de problemas de conducta y alteraciones neurocognitivas (Candelaria-Cook et al., 2022; Meng & Xiang, 2016). Por ejemplo, en TDAH se ha reportado una alta amplitud en los ritmos theta a expensas de la amplitud de los ritmos alfa y beta,

principalmente en adolescentes expuestos a experiencias adversas durante su niñez (Arns et al., 2012).

En niños con problemas de lectura y TDAH se halló una menor coherencia total entre la banda alfa y beta en las regiones frontales y parietales, indicando una CFU anormal en niños con estos trastornos del neurodesarrollo, en quienes también se suele observar un menor control ejecutivo (Tabiee et al., 2023).

### **Discusión y aplicaciones de la electroencefalografía en reposo (EGG-ER)**

La adolescencia es una fase crucial en la que maduran las FE más complejas, las cuales permiten un funcionamiento ajustado a las demandas constantes de ambientes cada vez más complejos. A pesar de ello, la adolescencia también se trata de una etapa del ciclo vital marcada por el riesgo de problemas de salud mental, riesgo social y dificultades socioafectivas (Ganesan & Steinbeis, 2022), especialmente si el adolescente no cuenta con un repertorio adecuado de funcionamiento ejecutivo que le permita responder a estas demandas.

El uso de algoritmos automatizados y procedimientos estadísticos para procesar y analizar señales obtenidas mediante electroencefalografía ha permitido la aparición de nuevas propuestas para el uso del EEG-ER como método complementario en los procesos diagnósticos clínicos. Actualmente, se han iniciado estudios con diversas poblaciones para identificar biomarcadores predictivos o diagnósticos. Por ejemplo, se han empleado estos indicadores para discriminar adolescentes con síntomas depresivos (Najafabadi & Bagh, 2023), con riesgo de suicidio (Hu et al., 2023; Amico et al., 2023), con trastorno del espectro autista (Neo et al., 2023; Neuhaus et al., 2021), y con problemas conductuales y neurocognitivos (Tabiee et al., 2023). Esta herramienta ayudaría a identificar casos con mayor riesgo de alteraciones neurocognitivas, conductuales y emocionales, incluso antes de que se manifiesten clínicamente.

El mayor valor de las medidas de EEG-ER radica en complementar la evaluación neuropsicológica y la historia clínica de los adolescentes con medidas objetivas de la actividad cerebral, lo cual permite lograr diagnósticos clínicos más precisos (por ejemplo, incluyendo índices extraídos del EEG-ER en las variantes de TDAH, como lo observado por Herrera-Morales et al., 2023). Asimismo, estos índices son esenciales en la validación de protocolos terapéuticos dirigidos a la atención de adolescentes con daño cerebral, trastornos del neurodesarrollo, consumo de sustancias o dificultades conductuales. Con su implementación, puede determinarse cuál es la intervención idónea para cada adolescente y se puede hacer seguimiento y valoración de la efectividad de las intervenciones implementadas.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de la asociación entre los cambios en los principales índices extraídos del EEG-ER, el desarrollo de las funciones ejecutivas y los posibles problemas asociados a un desarrollo anómalo, medido a través de estos índices.

**Tabla 1**

*Resumen de los principales cambios en el EEG-ER y el desarrollo de las FE durante la adolescencia*

Índice	Cambio esperado en adolescentes	Relación con FE	Indicador de disfunción
Poder ondas lentas (delta y theta)	Menor poder prefrontal	Menor impulsividad; mejoría en la planificación y el control de la conducta	Alto poder anterior relacionado con hipofunción de la CPF, problemas de desarrollo intelectual, pobre control emocional, depresión y afecto negativo
Poder alfa	Cambios en U invertida	Mejor comunicación interhemisférica y cortico-subcortical; mejor control motor, mejores habilidades sociales	Bajo poder relacionado con impulsividad, hiperactividad, agresividad y conductas antisociales
Poder beta	Mayor poder prefrontal medial y corteza cingulada anterior	Mayor desarrollo de la red DMN y cíngulo-opercular; mejoría en el control inhibitorio.	Bajo poder prefrontal medial relacionado con pobre autorregulación, afecto negativo, ansiedad y depresión
Asimetría Frontal Alfa (FFA)	Se reduce y estabiliza	Mayor control del afecto negativo, la ansiedad y las conductas evitativas	Mayor FFA se relaciona con ansiedad, impulsividad y afecto negativo
Radio ondas lentas/ondas rápidas (SW/FW)	Reducción en regiones frontales	Mayor desarrollo de la red CEN; mejoría en la flexibilidad cognitiva, toma de decisiones, fluidez verbal, metacognición y memoria de trabajo	Alto SW/FW se asocia con síntomas de TDAH y pobre control atencional y emocional
Acople en fase-amplitud (PAC)	Menor en banda delta global; menor PAC SW/FW en hemisferio izquierdo	Sensación de control y bienestar emocional; regulación del afecto negativo	Alto PAC SW/FW relacionado con afecto negativo, síntomas de depresión y pobre control emocional
Conectividad funcional	Mayor segregación y menor integración en las redes DMN, CEN, cíngulo-opercular y frontolimbica	Mejores habilidades de inhibición, planificación, solución de problemas y control atencional	Pobre segregación relacionada con trastornos del neurodesarrollo; alta integración relacionada con fallas para el control atencional y toma de decisiones

Nota. CPF: corteza prefrontal; CEN: red de control ejecutivo; DMN: red de funcionamiento por defecto.

Lo anterior tiene múltiples implicaciones, ya que facilita el desarrollo de una neurociencia conductual orientada a la promoción y prevención de problemas de salud mental. Su implementación contribuiría a la detección temprana de poblaciones en riesgo, permitiendo realizar acciones preventivas específicas para grupos con riesgo de trastornos mentales o comportamentales. De igual forma, puede ser empleado como medida de impacto para evaluar el resultado de programas de promoción de la salud mental en contextos comunitarios vulnerables.

El empleo del EEG-ER también puede ser valioso en otros campos. En el campo educativo, el uso del EEG-ER puede apoyar la caracterización neurofuncional de estudiantes con necesidades educativas especiales, facilitando la adaptación de estrategias pedagógicas basadas en evidencia. En el campo forense, estos índices pueden

ofrecer información complementaria sobre el funcionamiento ejecutivo de adolescentes en conflicto con la ley, promoviendo decisiones jurídicas más justas y fundamentadas.

Es importante señalar que, aunque resulta relevante la validación de los indicadores extraídos del EEG-ER como biomarcadores para el diagnóstico de alteraciones en el desarrollo mental y la presencia de problemas de conducta, la evidencia revisada indica que estos patrones electroencefalográficos no deberían utilizarse como única medida diagnóstica de psicopatologías o disfunciones en FE. Aunque el uso de los índices del EEG-ER como biomarcadores de posibles trastornos del neurodesarrollo y de la conducta resulta prometedor, aún existen controversias relacionadas con la homogeneidad de las medidas. Una primera fuente de variación individual en las medidas extraídas del EEG-ER es el sexo: se han reportado comportamientos inconsistentes en el poder espectral entre hombres y mujeres (Howsley & Levita, 2018; Neuhaus et al., 2021; 2023; Ott et al., 2021).

El problema de la variabilidad entre los sexos es más notorio durante la adolescencia, momento en el que ocurren numerosos dimorfismos estructurales y funcionales asociados a las hormonas sexuales y a la diversidad de roles de género que asumen los adolescentes (Candelaria-Cook et al., 2022; Machinskaya et al., 2019). A pesar de esta inconsistencia en los resultados, algunos autores proponen que existe mayor homogeneidad en el EEG-ER entre adolescentes con trastornos en FE, de tal forma que los biomarcadores para trastornos en el desarrollo ejecutivo serían mucho más consistentes que aquellos asociados al desarrollo normal (Cave & Barry, 2021; Neuhaus et al., 2023).

Además del sexo, también se han reportado variaciones transculturales en el EEG-ER, las cuales podrían estar relacionadas con diferencias culturales en las prácticas de crianza, la alimentación y la genética poblacional (Alahmadi et al., 2016). En el futuro, será necesario establecer hasta qué punto estas variaciones individuales y culturales permiten el uso de los índices extraídos desde el EEG-ER

como biomarcadores confiables de los trastornos en el desarrollo de las funciones ejecutivas.

En resumen, este es un campo de investigación traslacional que ha acumulado suficiente conocimiento sobre la relación entre la maduración cerebral, el registro de patrones de activación cerebral mediante EEG y el desarrollo adecuado, en contraste con el riesgo de aparición de problemas conductuales, emocionales y cognitivos en niños y adolescentes, los cuales pueden prolongarse hasta la adultez. Por tanto, existe suficiente evidencia para integrar esta herramienta y sus hallazgos en la práctica clínica cotidiana de psicólogos clínicos, psiquiatras y neuropsicólogos, con el fin de lograr una mejor discriminación diagnóstica. En este sentido, el uso del EEG-ER representa una herramienta innovadora para fortalecer tanto la evaluación como la intervención en el desarrollo ejecutivo durante la adolescencia. Su valor trasciende el ámbito clínico, extendiéndose a escenarios educativos, legales, políticos y sociales donde el conocimiento sobre el funcionamiento neurofisiológico puede mejorar significativamente la toma de decisiones. No obstante, su implementación sistemática aún requiere esfuerzos de estandarización, validación y formación de profesionales en el análisis e interpretación de estos biomarcadores. Futuras investigaciones deben enfocarse en traducir estos hallazgos a protocolos aplicables y accesibles, que optimicen la prevención y el tratamiento de dificultades en el desarrollo ejecutivo desde una perspectiva contextualizada, ética y basada en la evidencia.

## Referencias

- Alahmadi, N., Evdokimov, S. A., Kropotov, Y. J., Müller, A. M., & Jäncke, L. (2016). Different resting state EEG features in children from Switzerland and Saudi Arabia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 559. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00559>
- Ambrosini, E., & Vallesi, A. (2016). Asymmetry in prefrontal resting-state EEG spectral

- power underlies individual differences in phasic and sustained cognitive control. *NeuroImage*, 124, 843-857. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.09.035>
- Amico, F., Frye, R. E., Shannon, S., & Rondeau, S. (2023). Resting state EEG correlates of suicide ideation and suicide attempt. *Journal of Personalized Medicine*, 13(6), 884. <https://doi.org/10.3390/jpm13060884>
- Anderson, A. J., & Perone, S. (2018). Developmental change in the resting state electroencephalogram: Insights into cognition and the brain. *Brain and Cognition*, 126, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.08.001>
- Arns, M., Conners, C. K., & Kraemer, H. C. (2012). A decade of EEG theta/beta ratio research in ADHD. *Journal of Attention Disorders*, 17(5), 374-383. <https://doi.org/10.1177/1087054712460087>
- Auerbach, R. P., Stewart, J. G., Stanton, C. H., Mueller, E. M., & Pizzagalli, D. A. (2015). Emotion-processing biases and resting EEG activity in depressed adolescents. *Depression and Anxiety*, 32(9), 693-701. <https://doi.org/10.1002/da.22381>
- Baum, G. L., Ciric, R., Roalf, D. R., Betzel, R. F., Moore, T. M., Shinohara, R. T., Kahn, A. E., Vandekar, S. N., Rupert, P. E., Quarmley, M., Cook, P. A., Elliott, M. A., Ruparel, K., Gur, R. E., Gur, R. C., Bassett, D. S., & Satterthwaite, T. D. (2017). Modular segregation of structural brain networks supports the development of executive function in youth. *Current Biology*, 27(11), 1561-1572.e8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.051>
- Blakemore, S.-J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(3-4), 296-312. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01611.x>
- Briesemeister, B. B., Tamm, S., Heine, A., & Jacobs, A. M. (2013). Approach the good, withdraw from the bad—A review on frontal alpha asymmetry measures in applied psychological research. *Psychology*, 4(3), 261-267. <https://doi.org/10.4236/psych.2013.43a039>
- Brzezicka, A., Kamiński, J., Kamińska, O. K., Wołyńczyk-Gmaj, D., & Sedek, G. (2017). Frontal EEG alpha band asymmetry as a predictor of reasoning deficiency in depressed people. *Cognition and Emotion*, 31(5), 868-878. <https://doi.org/10.1080/02699931.2016.1170669>
- Candelaria-Cook, F. T., Solis, I., Schendel, M. E., Wang, Y. P., Wilson, T. W., Calhoun, V. D., & Stephen, J. M. (2022). Developmental trajectory of MEG resting-state oscillatory activity in children and adolescents: A longitudinal reliability study. *Cerebral Cortex*, 32(23), 5404-5419. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac023>
- Cave, A. E., & Barry, R. J. (2021). Sex differences in resting EEG in healthy young adults. *International Journal of Psychophysiology*, 161, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.01.008>
- Chung, Y. G., Jeon, Y., Kim, R. G., Cho, A., Kim, H., Hwang, H., Choi, J., & Kim, K. J. (2022). Variations of resting-state EEG-based functional networks in brain maturation from early childhood to adolescence. *Journal of Clinical Neurology*, 18(5), 581-593. <https://doi.org/10.3988/jcn.2022.18.5.581>
- Çiçek, M., & Nalçac, E. (2001). Interhemispheric asymmetry of EEG alpha activity at rest and during the Wisconsin Card Sorting Test: Relations with performance. *Biological Psychology*, 58(1), 75-88. [https://doi.org/10.1016/s0301-0511\(01\)00103-x](https://doi.org/10.1016/s0301-0511(01)00103-x)
- Clark, A. P., Bontemps, A. P., Houser, R. A., & Salekin, R. T. (2022). Psychopathy and resting state EEG theta/beta oscillations in adolescent offenders. *Journal of Psychopathology and Behavioral Assessment*, 44(1), 64-80. <https://doi.org/10.1007/s10862-021-09915-x>
- Clarke, A. R., Barry, R. J., Karamacoska, D., & Johnstone, S. J. (2019). The EEG theta/beta ratio: A marker of arousal or cognitive processing capacity?

- Applied Psychophysiology Biofeedback*, 44(2), 123-129. <https://doi.org/10.1007/S10484-018-09428-6>
- Cristofori, I., Cohen-Zimmerman, S., & Grafman, J. (2019). Executive functions. In M. D'Esposito (Ed.), *Handbook of Clinical Neurology* (1st ed., Vol. 163, pp. 197-219). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Das, A., de los Angeles, C., & Menon, V. (2022). Electrophysiological foundations of the human default-mode network revealed by intracranial-EEG recordings during resting-state and cognition. *NeuroImage*, 250, 118927. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.118927>
- De Pascalis, V., Vecchio, A., & Cirillo, G. (2020). Resting anxiety increases EEG delta-beta correlation: Relationships with the Reinforcement Sensitivity Theory personality traits. *Personality and Individual Differences*, 156, 109796. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2019.109796>
- Feldmann, L., Piechaczek, C. E., Grunewald, B. D., Pehl, V., Bartling, J., Frey, M., Schulte-Körne, G., & Greimel, E. (2018). Resting frontal EEG asymmetry in adolescents with major depression: Impact of disease state and comorbid anxiety disorder. *Clinical Neurophysiology*, 129(12), 2577-2585. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.09.028>
- Forbes, O., Schwenn, P. E., Wu, P. P. Y., Santos-Fernandez, E., Xie, H. B., Lagopoulos, J., McLoughlin, L. T., Sacks, D. D., Mengersen, K., & Hermens, D. F. (2022). EEG-based clusters differentiate psychological distress, sleep quality and cognitive function in adolescents. *Biological Psychology*, 173, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2022.108403>
- Foulkes, L., & Blakemore, S. J. (2016). Is there heightened sensitivity to social reward in adolescence? *Current Opinion in Neurobiology*, 40, 81-85. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2016.06.016>
- Fuhrmann, D., Knoll, L. J., & Blakemore, S. L. (2015). Adolescence as a sensitive period of brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 558-566.
- Galiana-Simal, A., Vecina-navarro, P., Sánchez-ruiz, P., & Vela-romero, M. (2020). Electroencefalografía cuantitativa como herramienta para el diagnóstico y seguimiento del paciente con trastorno por déficit de atención / hiperactividad. *Revista de Neurología*, 70(6), 197-205. <https://doi.org/10.33588/rn.7006.2019311>
- Galicia-Alvarado, M., Flores-Ávalos, B., Sánchez-Quezada, A., Yáñez-Suárez, Ó., & Brust-Carmona, H. (2016). Correlación del funcionamiento ejecutivo y la potencia absoluta del EEG en niños. *Salud Mental*, 39(5), 267-274. <https://doi.org/10.17711/S.M.0185-3325.2016.031>
- Ganesan, K., & Steinbeis, N. (2022). Development and plasticity of executive functions: A value-based account. *Current Opinion in Psychology*, 44, 215-219. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.09.012>
- Grunewald, B. D., Greimel, E., Trinkl, M., Bartling, J., Großheinrich, N., & Schulte-Körne, G. (2018). Resting frontal EEG asymmetry patterns in adolescents with and without major depression. *Biological Psychology*, 132, 212-216. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2017.12.002>
- Herrera-Morales, W. V., Reyes-López, J. V., Tuz-Castellanos, K. N. H., Ortegón-Abud, D., Ramírez-Lugo, L., Santiago-Rodríguez, E., & Núñez-Jaramillo, L. (2023). Variations in theta/beta ratio and cognitive performance in subpopulations of subjects with ADHD symptoms: Towards neuropsychological profiling for patient subgrouping. *Journal of Personalized Medicine*, 13(9), 1361. <https://doi.org/10.3390/jpm13091361>
- Hevia-Orozco, J. C., & Sanz-Martin, A. (2018). EEG characteristics of adolescents raised in institutional environments and their relation to psychopathological symptoms. *Journal of Behavioral and Brain Science*,

- 8(10), 519-537. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2018.810032>
- Howsley, P., & Levita, L. (2018). Developmental changes in the cortical sources of spontaneous alpha throughout adolescence. *International Journal of Psychophysiology*, 133, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2018.08.003>
- Hu, J., Zhou, D., Ma, L., Zhao, L., He, X., Peng, X., Chen, R., Chen, W., Jiang, Z., Ran, L., Liu, X., Tao, W., Yuan, K., & Wang, W. (2023). A resting-state electroencephalographic microstates study in depressed adolescents with non-suicidal self-injury. *Journal of Psychiatric Research*, 165, 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2023.07.020>
- Hu, L., Tan, C., Xu, J., Qiao, R., Hu, Y., & Tian, Y. (2024). Decoding emotion with phase-amplitude fusion features of EEG functional connectivity network. *Neural Networks*, 172, 106148. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2024.106148>
- Jones, J. S., & Astle, D. E. (2022). Segregation and integration of the functional connectome in neurodevelopmentally “at risk” children. *Developmental Science*, 25(3), e13209. <https://doi.org/10.1111/desc.13209>
- Karamacoska, D., Barry, R. J., Steiner, G. Z., Coleman, E. P., & Wilson, E. J. (2018). Intrinsic EEG and task-related changes in EEG affect Go/NoGo task performance. *International Journal of Psychophysiology*, 125, 17-28.
- Knyazev, G. G. (2012). EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(1), 677-695. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.10.002>
- Kobayashi, R., Honda, T., Hashimoto, J., Kashihara, S., Iwasa, Y., Yamamoto, K., Zhu, J., Kawahara, T., Anno, M., Nakagawa, R., Haraguchi, Y., & Nakao, T. (2020). Resting-state theta/beta ratio is associated with distraction but not with reappraisal. *Biological Psychology*, 155, 107942. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2020.107942>
- Lanfranco, R. C., Dos, F., Sousa, S., Wessel, P. M., Rivera-Rei, Á., Bekinschtein, T. A., Lucero, B., Canales-Johnson, A., & Huepe, D. (2023). *Slow-wave brain connectivity predicts executive functioning and group belonging in socially vulnerable individuals* [Preprint]. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2023.07.19.549808>
- Li, Q., Xia, M., Zeng, D., Xu, Y., Sun, L., Liang, X., Xu, Z., Zhao, T., Liao, X., Yuan, H., Liu, Y., Huo, R., Li, S., & He, Y. (2024). Development of segregation and integration of functional connectomes during the first 1,000 days. *Cell Reports*, 43(5), 114168. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114168>
- Lum, J. A. G., Clark, G. M., Bigelow, F. J., & Enticott, P. G. (2022). Resting state electroencephalography (EEG) correlates with children’s language skills: Evidence from sentence repetition. *Brain and Language*, 230, 105137. <https://doi.org/10.1016/J.BANDL.2022.105137>
- Machinskaya, R. I., Kurgansky, A. V., & Lomakin, D. I. (2019). Age-related trends in functional organization of cortical parts of regulatory brain systems in adolescents: an analysis of resting-state networks in the EEG source space. *Human Physiology*, 45(5), 461-473. <https://doi.org/10.1134/s0362119719050098>
- Marek, S., Tervo-Clemmens, B., Klein, N., Foran, W., Ghuman, A. S., & Luna, B. (2018). Adolescent development of cortical oscillations: Power, phase, and support of cognitive maturation. *PLOS Biology*, 16(11), e2004188. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004188>
- Meghdadi, A. H., Karic, M. S., McConnell, M., Rupp, G., Richard, C., Hamilton, J., Salat, D., & Berka, C. (2021). Resting state EEG biomarkers of cognitive decline associated with Alzheimer’s disease and mild cognitive impairment. *PLOS ONE*, 16(2), e0244180. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244180>

- Meiers, G., Nooner, K., De Bellis, M. D., Debnath, R., & Tang, A. (2020). Alpha EEG asymmetry, childhood maltreatment, and problem behaviors: A pilot home-based study. *Child Abuse & Neglect*, 101, 104358. <https://doi.org/10.1016/j.chiabu.2020.104358>
- Meng, L., & Xiang, J. (2016). Frequency specific patterns of resting-state networks development from childhood to adolescence: A magnetoencephalography study. *Brain and Development*, 38(10), 893-902. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2016.05.004>
- Meza-Cervera, T., Kim-Spoon, J., & Bell, M. A. (2023). Adolescent depressive symptoms: the role of late childhood frontal EEG asymmetry, executive function, and adolescent cognitive reappraisal. *Research on Child and Adolescent Psychopathology*, 51(2), 193-207. <https://doi.org/10.1007/S10802-022-00983-5/FIGURES/4>
- Müller, U., & Kerns, K. (2015). The development of executive function. In L. Liben & U. Müller (Eds.), *Handbook of child psychology and developmental science* (7th ed., Vol. 2, pp. 571-623). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118963418.childpsy214>
- Najafabadi, A., & Bagh, K. (2023). *Resting-state EEG classification of children and adolescents diagnosed with major depression disorder using convolutional neural network*. [Preprint]. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31234/osf.io/8j9e6>
- Neo, W. S., Foti, D., Keehn, B., & Kelleher, B. (2023). Resting-state EEG power differences in autism spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis. *Translational Psychiatry*, 13(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41398-023-02681-2>
- Nettinga, J., Naseem, S., Yakobi, O., Willoughby, T., & Danckert, J. (2023). Exploring EEG resting state as a function of boredom proneness in pre-adolescents and adolescents. *Experimental Brain Research*, 242(1), 123-135. <https://doi.org/10.1007/s00221-023-06733-3>
- Neuhaus, E., Lowry, S. J., Santhosh, M., Kresse, A., Edwards, L. A., Keller, J., Libsack, E. J., Kang, V. Y., Naples, A., Jack, A., Jeste, S., McPartland, J. C., Aylward, E., Bernier, R., Bookheimer, S., Dapretto, M., Van Horn, J. D., Pelphrey, K., & Webb, S. J. (2021). Resting state EEG in youth with ASD: Age, sex, and relation to phenotype. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 13(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s11689-021-09390-1>
- Neuhaus, E., Santhosh, M., Kresse, A., Aylward, E., Bernier, R., Bookheimer, S., Jeste, S., Jack, A., McPartland, J. C., Naples, A., Van Horn, J. D., Pelphrey, K., & Webb, S. J. (2023). Frontal EEG alpha asymmetry in youth with autism: Sex differences and social-emotional correlates. *Autism Research*, 16(12), 2364-2377. <https://doi.org/10.1002/aur.3032>
- Ott, L. R., Penhale, S. H., Taylor, B. K., Lew, B. J., Wang, Y. P., Calhoun, V. D., Stephen, J. M., & Wilson, T. W. (2021). Spontaneous cortical MEG activity undergoes unique age- and sex-related changes during the transition to adolescence. *NeuroImage*, 244, 118552. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118552>
- Popov, T., Tröndle, M., Baranczuk-Turska, Z., Pfeiffer, C., Haufe, S., & Langer, N. (2023). Test-retest reliability of resting-state EEG in young and older adults. *Psychophysiology*, 60(7), e14268. <https://doi.org/10.1111/psyp.14268>
- Pössel, P., Lo, H., Fritz, A., & Seemann, S. (2008). A longitudinal study of cortical EEG activity in adolescents. *Biological Psychology*, 78(2), 173-178. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2008.02.004>
- Putman, P. (2011). Resting state EEG delta-beta coherence in relation to anxiety, behavioral inhibition, and selective attentional processing of threatening stimuli. *International Journal of Psychophysiology*, 80(1), 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.01.011>
- Putman, P., van Peer, J., Maimari, I., & van der Werff, S. (2010). EEG theta/



- beta ratio in relation to fear-modulated response-inhibition, attentional control, and affective traits. *Biological Psychology*, 83(2), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2009.10.008>
- Putman, P., Verkuil, B., Arias-Garcia, E., Pantazi, I., & Van Schie, C. (2014). EEG theta/beta ratio as a potential biomarker for attentional control and resilience against deleterious effects of stress on attention. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 14(2), 782-791. <https://doi.org/10.3758/s13415-013-0238-7>
- Rommel, A. S., James, S. N., McLoughlin, G., Brandeis, D., Banaschewski, T., Asherson, P., & Kuntsi, J. (2017). Altered EEG spectral power during rest and cognitive performance: A comparison of preterm-born adolescents to adolescents with ADHD. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 26(12), 1511. <https://doi.org/10.1007/s00787-017-1010-2>
- Sacks, D. D., Schwenn, P. E., Boyes, A., Mills, L., Driver, C., Gatt, J. M., Lagopoulos, J., & Hermens, D. F. (2023). Longitudinal associations between resting-state, interregional theta-beta phase-amplitude coupling, psychological distress, and wellbeing in 12–15-year-old adolescents. *Cerebral Cortex*, 33(12), 8066-8074. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad099>
- Sacks, D. D., Schwenn, P. E., De Regt, T., Driver, C., McLoughlin, L. T., Lagopoulos, J., & Hermens, D. F. (2023). Early adolescent psychological distress and cognition, correlates of resting-state EEG, interregional phase-amplitude coupling. *International Journal of Psychophysiology*, 183, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2022.11.012>
- Sacks, D. D., Schwenn, P. E., McLoughlin, L. T., Lagopoulos, J., & Hermens, D. F. (2021). Phase-amplitude coupling, mental health and cognition: Implications for adolescence. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 622313. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.622313>
- Sargent, K., Chavez-Baldini, U. Y., Master, S. L., Verweij, K. J. H., Lok, A., Sutterland, A. L., Vulink, N. C., Denys, D., Smit, D. J. A., & Nieman, D. H. (2021). Resting-state brain oscillations predict cognitive function in psychiatric disorders: A transdiagnostic machine learning approach. *NeuroImage: Clinical*, 30, 102617. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102617>
- Schutter, D. J. L. G., & Knyazev, G. G. (2012). Cross-frequency coupling of brain oscillations in studying motivation and emotion. *Motivation and Emotion*, 36(1), 46-54. <https://doi.org/10.1007/s11031-011-9237-6>
- Schwartzmann, B., Quilty, L. C., Dhimi, P., Uher, R., Allen, T. A., Kloiber, S., Lam, R. W., Frey, B. N., Milev, R., Müller, D. J., Soares, C. N., Foster, J. A., Rotzinger, S., Kennedy, S. H., & Farzan, F. (2023). Resting-state EEG delta and alpha power predict response to cognitive behavioral therapy in depression: A Canadian Biomarker Integration Network for Depression study. *Scientific Reports* 13(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35179-4>
- Shim, M., Im, C. H., Kim, Y. W., & Lee, S. H. (2018). Altered cortical functional network in major depressive disorder: A resting-state electroencephalogram study. *NeuroImage: Clinical*, 19, 1000-1007. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.06.012>
- Smith, E. E., Reznik, S. J., Stewart, J. L., & Allen, J. J. B. (2017). Assessing and conceptualizing frontal EEG asymmetry: An updated primer on recording, processing, analyzing, and interpreting frontal alpha asymmetry. *International Journal of Psychophysiology* 111, 98-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.11.005>
- Tabiee, M., Azhdarloo, A., & Azhdarloo, M. (2023). Comparing executive functions in children with attention deficit hyperactivity disorder with or without reading disability: A resting-state EEG study. *Brain and Behavior*, 13(4), e2951. <https://doi.org/10.1002/brb3.2951>

- Tomarken, A. J., Dichter, G. S., Garber, J., & Simien, C. (2004). Resting frontal brain activity: Linkages to maternal depression and socio-economic status among adolescents. *Biological Psychology*, 67(1-2), 77-102. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2004.03.011>
- Tortella-Feliu, M., Morillas-romero, A., Balle, M., Llabrés, J., Bornas, X., & Putman, P. (2014). Spontaneous EEG activity and spontaneous emotion regulation. *International Journal of Psychophysiology*, 94(3), 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.09.003>
- van der Vinne, N., Vollebregt, M. A., van Putten, M. J. A. M., & Arns, M. (2017). Frontal alpha asymmetry as a diagnostic marker in depression: Fact or fiction? A meta-analysis. *NeuroImage: Clinical*, 16, 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2017.07.006>
- van Son, D., Angelidis, A., Hagens, M. A., van der Does, W., & Putman, P. (2018). Early and late dot-probe attentional bias to mild and high threat pictures: Relations with EEG theta/beta ratio, self-reported trait attentional control, and trait anxiety. *Psychophysiology*, 55(12), e13274. <https://doi.org/10.1111/psyp.13274>
- van Son, D., van der Does, W., Band, G. P. H., & Putman, P. (2020). EEG theta/beta ratio neurofeedback training in healthy females. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 45(3), 195-210. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09472-1>
- Zelazo, P. D. (2020). Executive function and psychopathology: A neurodevelopmental perspective. *Annual Review of Clinical Psychology*, 16, 431-454. <https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-072319-024242>
- Zhang, D. W., Johnstone, S. J., Li, H., Luo, X., & Sun, L. (2023). Comparing the transfer effects of three neurocognitive training protocols in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: A single-case experimental design. *Behaviour Change*, 40(1), 11-29. <https://doi.org/10.1017/bec.2021.26>
- Zhang, D. W., Li, H., Wu, Z., Zhao, Q., Song, Y., Liu, L., Qian, Q., Wang, Y., Roodenrys, S., Johnstone, S. J., De Blasio, F. M., & Sun, L. (2017). Electroencephalogram theta/beta ratio and spectral power correlates of executive functions in children and adolescents With AD/HD. *Journal of Attention Disorders*, 23(7), 721-732. <https://doi.org/10.1177/1087054717718263>
- Zhang, Y., Wu, W., Toll, R. T., Naparstek, S., Maron-Katz, A., Watts, M., Gordon, J., Jeong, J., Astolfi, L., Shpigel, E., Longwell, P., Sarhadi, K., El-Said, D., Li, Y., Cooper, C., Chin-Fatt, C., Arns, M., Goodkind, M. S., Trivedi, M. H., ... Etkin, A. (2020). Identification of psychiatric disorder subtypes from functional connectivity patterns in resting-state electroencephalography. *Nature Biomedical Engineering*, 5(4), 309-323. <https://doi.org/10.1038/s41551-020-00614-8>

## Notas

- \* Artículo de investigación. Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses. Este artículo no recibió recursos de financiación. Se declara que no se utilizó IA para la búsqueda de información ni para el desarrollo del manuscrito.