

Tecnologías Emergentes en el Diagnóstico y Tratamiento del TDAH Emerging Technologies in the Diagnosis and Treatment of ADHD

J. Aparicio-Juárez ^a, O. A. Domínguez-Ramírez ^{a,*}, E. A. Escotto-Córdova ^b

^aÁrea Académica de Computación y Electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bLaboratorio de Psicología y Neurociencias, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

Resumen

El Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH), representa una preocupación significativa en Estados Unidos y México, ya que afecta el rendimiento académico y la calidad de vida de quienes lo padecen. Las limitaciones de los métodos de diagnóstico y tratamiento tradicionales, particularmente en la detección y atención temprana, motiva a la exploración de nuevos procedimientos y propuestas tecnológicas. Este artículo revisa los avances en el diagnóstico y tratamiento del TDAH, destacando plataformas y metodologías innovadoras. La investigación considera a la pupilometría como herramienta de diagnóstico y profundiza en la neuroretroalimentación y biorretroalimentación como protocolos de tratamiento prometedores. Se discute la utilización de Sistemas de Interacción Humano-Robot (HRpI) e Interfaces Cerebro-Computadora (BCI) como vías emergentes para mejorar la calidad de vida de los pacientes. Se destaca la importancia del uso de métricas sólidas, así como el análisis de señales y datos; por ello, se incorporan pruebas como el Test de Atención D2, el Test Go/No-Go, Tareas de Ejecución Continua (CPT) y el Test de Variables de Atención (TOVA). Finalmente se aborda la aplicación de algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) como herramientas de apoyo al diagnóstico. Estos desarrollos progresivos representan un futuro prometedor para el manejo del TDAH y enfatizan la necesidad de colaboración interdisciplinaria entre la psicología, las neurociencias, la ingeniería y la salud mental.

Palabras Clave: TDAH, Biorretroalimentación, Inteligencia Artificial, HRpI, BCI.

Abstract

Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD) poses a significant concern in both the United States and Mexico, impacting academic performance and the quality of life for those affected. Limitations in traditional diagnostic and treatment methods, particularly in early detection and intervention, prompt the exploration of new procedures and technological proposals. This article reviews advancements in the diagnosis and treatment of ADHD, highlighting innovative platforms and methodologies. The research considers pupillometry as a diagnostic tool and delves into neurofeedback and biofeedback as promising treatment protocols. The use of Human-Robot Interaction Systems (HRpI) and Brain-Computer Interfaces (BCI) is discussed as emerging avenues to enhance the quality of life for patients. Emphasis is placed on the importance of utilizing robust metrics, signal analysis, and data; thus, incorporating assessments such as the D2 Attention Test, the Go/No-Go Test, Continuous Performance Tasks (CPT), and the Test of Variables of Attention (TOVA). Finally, the application of Artificial Intelligence (AI) algorithms as diagnostic support tools is addressed. These progressive developments represent a promising future for ADHD management and underscore the need for interdisciplinary collaboration among psychology, neuroscience, engineering, and mental health.

Keywords: ADHD, Biofeedback, Artificial Intelligence, HRpI, BCI.

1. Introducción

El Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH) se caracteriza por un patrón persistente de inatención, hiperactividad o impulsividad, afectando a individuos de todas

las edades. Las variaciones en el funcionamiento de los lóbulos frontal y parietal del cerebro, encargados de la organización, concentración y procesamiento sensorial, son evidentes en personas con TDAH. En particular, se observa una discrepancia en la frecuencia de vibración de las ondas cerebrales en compara-

*Autor para correspondencia: omar@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: jeronimoaj@gmail.com (Jeronimo Aparicio-Juarez), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Dominguez-Ramirez), alejandro.escotto@zaragoza.unam.mx (Eduardo-Alejandro Escotto-Córdova).

Historial del manuscrito: recibido el 14/11/2023, última versión-revisada recibida el 12/01/2024, aceptado el 19/01/2024, en línea (postprint) desde el 24/01/2024, publicado el 05/07/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12i23.12081>



ción con la pauta esperada de manera natural (Barkley, 2006). Los síntomas pueden interferir en las actividades y las relaciones diarias. Este trastorno comienza en la niñez y puede continuar hasta la adolescencia e incluso la edad adulta según el (NIMH, 2021). El TDAH no se puede curar, se puede controlar con éxito y algunos síntomas pueden mejorar a medida que el niño crece reporta el (National Center on Birth Defects and Developmental Disabilities (NCBDDD), 2023). La investigación actual sugiere que puede ser causado por la interacción entre los genes y el medio ambiente o factores no genéticos. Al igual que muchas otras enfermedades, hay una serie de factores que pueden contribuir a este trastorno (genes, consumo de tabaco, alcohol o drogas durante el embarazo, exposición a toxinas ambientales como niveles altos de plomo a una edad temprana, bajo peso al nacer y lesiones cerebrales) menciona el (NIMH, 2021).

1.1. Estadísticas (EEUU y México)

Según estadísticas de la (World Health Organization, 2019), el TDAH es uno de los trastornos mentales más comunes; afecta entre el 5 % y el 8 % de los niños, en su mayoría varones, y suele durar hasta la edad adulta. La cantidad estimada de niños de 3 a 17 años que alguna vez fueron diagnosticados con TDAH, según una encuesta nacional de padres en los Estados Unidos (Bitsko, 2022) (entre los años 2016 y 2019), es de 5.965 millones (9.8 %) dentro de una población de 60.86 millones de niños; cuya organización, es: i) 265000 niños de 3 a 5 años de edad, ii) 2.4 millones de niños de 6 a 11 años de edad, y iii) 3.3 millones de niños de 12 a 17 años de edad. Los niños (13 %) tienen más probabilidades de ser diagnosticados con TDAH que las niñas (6 %). Los niños afroamericanos y los niños blancos son diagnosticados con TDAH con mayor frecuencia (12 % y 10 %, respectivamente), que los niños latinos (8 %) o los niños asiáticos (3 %) (Bitsko, 2022).

En México más de 2 millones de menores, viven con TDAH en sus diferentes etapas, de éstos, el 8 % está en edad escolar, por lo que es necesario que los padres de familia, maestros y médicos de primer nivel conozcan los síntomas para su atención temprana. El TDAH ocupa el octavo lugar entre las principales causas de atención en los servicios de Psiquiatría y Paidopsiquiatría de 60 unidades del ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado), entre hospitales generales y regionales, el Centro Médico Nacional “20 de noviembre” y la Clínica de Neuropsiquiatría, donde de enero a la fecha se han otorgado 1,922 consultas por esta causa y 79 por ciento de los pacientes son del sexo masculino (ISSSTE, 2022).

El IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social) reportó que en el año 2019 atendió a 87,645 niños con TDAH, a quienes se les otorgaron un total de 229,420 consultas, de las cuales 43,815 fueron de primera vez y en donde se realizó el diagnóstico, además de 185,605 consultas subsecuentes (IMSS, 2020).

1.2. Impacto académico del TDAH

En el impacto académico el TDAH afecta la capacidad de un estudiante para concentrarse, prestar atención, escuchar o esforzarse en el trabajo escolar. También puede hacer que un estudiante se ponga inquieto, hable demasiado o interrumpa la clase. Así mismo, puede tener problemas de aprendizaje que le

cause problemas en la escuela. La mayoría de los niños neurodivergentes comienzan la escuela antes de que se les diagnostique. Los maestros a veces son los primeros en notar posibles signos. Es posible que lo hablen con los padres del niño. Luego, el padre puede hacer que un especialista de atención médica evalúe al niño para ver si se trata del TDAH. En las instituciones educativas de EE.UU. los maestros son los encargados de ayudar a los padres si su hijo necesita un Programa de Educación Individual (del inglés, IEP) o un plan 504. El IEP es un plan escrito que brinda educación especial individualizada y servicios relacionados. El maestro podría sugerir una evaluación para conocer si su hijo podría beneficiarse de un IEP o por otro lado el plan 504 el cual brinda servicios y cambios en el entorno de aprendizaje para satisfacer las necesidades del niño (Nemours y Hasan, 2020).

En México, según una investigación realizada por la periodista Diana Rojas del portal de noticias Lado B (www.ladobe.com.mx), se destaca la importancia de la detección temprana y el tratamiento adecuado tanto en el hogar como en la escuela para el adecuado desenvolvimiento de los pacientes con Trastorno por Déficit de Atención e Hiperactividad (TDAH). Sin embargo, de acuerdo con una entrevista realizada a la pedagoga Liliana Gutiérrez, el sistema educativo mexicano, específicamente el de la Secretaría de Educación Pública (SEP), no está diseñado para facilitar el desenvolvimiento en el aula de menores con este trastorno, ya que se les exige permanecer sentados y tranquilos durante periodos prolongados (más de tres horas al día). Gutiérrez, quien labora en una escuela privada en la ciudad de Puebla, reconoce que el sistema educativo, tanto público como privado, no es completamente inclusivo para los pacientes con TDAH. La pedagoga sugiere que los profesores deberían supervisar de manera más cercana el trabajo de los niños con esta problemática, desde saber cómo abordar una crisis nerviosa hasta aprender a condensar las instrucciones para facilitar la realización de sus actividades escolares. Algunos docentes han intentado abordar este problema con la SEP, proponiendo soluciones en los consejos técnicos, como la implementación de programas de inclusión y cursos que proporcionen más información sobre el TDAH (Rojas y Gutiérrez, 2021).

En el año 2019, la SEP se encontraba en proceso de implementar mejoras en el Programa para la Inclusión y Equidad Educativa (PIEE); sin embargo, dicho proceso se vio interrumpido por la llegada de la pandemia en 2020. Anteriormente, este programa requería la presencia de dos profesores en el aula, uno de ellos especializado en educación especial, aunque este enfoque fue de corta duración. La pedagoga Gutiérrez reveló a LADO B que gradualmente se eliminaron los docentes especializados en educación especial. En la actualidad, los profesores no especializados deben trabajar con los recursos disponibles y aprovechar su ingenio. Además, la información destinada a atender a pacientes con TDAH no alcanza a todas las escuelas públicas, especialmente aquellas ubicadas fuera de las zonas urbanas. Los programas de inclusión son predominantemente exclusivos de las escuelas privadas, las cuales contratan psicólogas o psicólogos para brindar seguimiento y ofrecen talleres y congresos para su personal docente, con el objetivo de mantenerse actualizadas en el tratamiento del trastorno. Se concluye que el sistema educativo público se encuentra rezagado, siendo

crucial que la SEP demuestre un mayor interés y asignación de recursos a esta problemática para frenar el rezago académico de los niños y niñas con TDAH (Rojas y Gutiérrez, 2021).

En la actualidad existen diversos estudios que reportan los resultados de la aplicación de métricas clínicas para asociar métodos de diagnóstico con la sintomatología del TDAH para determinar el efecto de la estimulación neurocognitiva. Al realizar este procedimiento clínico es recomendable utilizar criterios cuantitativos de alguna prueba psicométrica de atención. Es importante mencionar que las dificultades en los procesos de atención y concentración pueden afectar otras habilidades neurocognitivas (memoria, planificación y toma de decisiones). La evaluación e intervención en los procesos de atención es la base para mejorar las Habilidades Básicas del Pensamiento (HBP) como son la lectura, escritura y cálculo. Las HBP son aquellas habilidades de pensamiento que sirven para desarrollarse intelectualmente en el mundo cotidiano, tienen una función social y visto de esta manera es importante que el estudiante no las haga a un lado (Guevara, 2000) en el nivel de educación básica. Las HBP no son suficientes a nivel universitario, las HBP se ven como un puente o un trampolín para las habilidades analíticas; es decir, deben servir de apoyo para comenzar a precisar algunas cuestiones de las Habilidades Analíticas de Pensamiento (HAP). Las HAP surgen de las HBP cuando estas últimas se refinan, para lograr esto es necesario hacer metacognición de las HBP y además interés por la reflexión (de Sánchez, 1995).

La investigación está inspirada en la creación de un sistema de interacción física humano-robot como herramienta de estimulación neurocognitiva en niños con TDAH, los resultados esperados de esta investigación promueven la idea de que un paciente neurodivergente pueda autoregular su comportamiento, permitiendo favorecer sus habilidades atencionales y control conductual y además potenciar las HBP para que les permita mejorar su rendimiento académico.

En la actualidad, la SEP provee como herramienta de monitoreo el Sistema de Alerta Temprana (SisAT), el cual es conjunto de indicadores, herramientas y procedimientos que permite a los colectivos docentes, a los supervisores y a la autoridad educativa local contar con información sistemática y oportuna acerca de los alumnos que están en riesgo de no alcanzar los aprendizajes clave o incluso de abandonar sus estudios. Asimismo, permite fortalecer la capacidad de evaluación interna e intervención de las escuelas, en el marco de la autonomía de gestión (SEP, 2023).

El propósito de SisAT es contribuir a la prevención y atención del rezago y el abandono escolar, al identificar a los alumnos en riesgo. Además, permite dar seguimiento a los avances que se espera obtener con la intervención educativa que decidan los maestros para atender a los estudiantes. De esta manera, el SisAT se vuelve una herramienta de apoyo para el trabajo colegiado del Consejo Técnico Escolar y un referente importante para el establecimiento de acciones de asesoría y acompañamiento a las escuelas por parte de la supervisión escolar. Los principales indicadores del SisAT dan cuenta del avance de los estudiantes en componentes básicos de lectura, escritura y cálculo mental. Integra además algunos datos básicos de los estudiantes que la escuela registra cotidianamente, como son: la inasistencia a clases, bajas calificaciones o asignaturas sin aprobar y el registro de alerta en el reporte de evaluación. Se com-

plementan opcionalmente con información sobre la participación en clase y el clima escolar (SEP, 2015). A pesar de los esfuerzos que se realizan a través de SisAT, no existen herramientas que complementen las intervenciones educativas de forma efectiva para lograr la estimulación neurocognitiva de la atención y mejorar las HBP, siendo los más afectados en su proceso de enseñanza-aprendizaje los niños diagnosticados con TDAH. La propuesta que se sugiere permitirá crear una ruta de mejora escolar a través del desarrollo de habilidades neurocognitivas específicas y servir como propuesta de valor al Programa Escolar de Mejora Continua (PEMC) el cual tiene como objetivo orientar, planear y materializar el avance de los aprendizajes de todos los alumnos. El PEMC es la expresión de las voluntades del colectivo docente y de la comunidad escolar para organizar las acciones encaminadas a lograr mejores resultados educativos y transitar hacia la Nueva Escuela Mexicana (NEM) (SEP, 2019) que es una reforma educativa actual del sistema educativo mexicano.

1.3. *Métodos de diagnóstico y tratamiento clásico*

En cuanto a los métodos de diagnóstico y tratamiento clásico la OMS recomiendan que las intervenciones de primera línea para el TDAH sean las no farmacológicas (ambientales, sociales, conductuales y psicológicas) y que sólo se sugiere la derivación a un especialista para considerar la prescripción del metilfenidato en caso de que no sean eficaces las intervenciones no farmacológicas. Estas directrices se encuentran actualmente en proceso de revisión y, según ha adelantado la OMS, en este proceso se tendrá en cuenta la capacidad de los sistemas de salud para hacer cumplir e implementar protocolos para el diagnóstico de TDAH, regular la prescripción e inicio del tratamiento con metilfenidato y garantizar un seguimiento clínico cuidadoso de los efectos adversos, la respuesta clínica, la adherencia, la aceptabilidad del tratamiento, los requisitos para el ajuste de la dosis y el riesgo de uso indebido, la sobremedicalización y el sobretratamiento de los problemas de conducta en los niños (WHO, 2021).

En México el IMSS cuenta con médicos especialistas en psiquiatría, psicología, trabajadores sociales además de contar con la "Guía de Práctica Clínica para el Diagnóstico y Tratamiento en el TDAH en niños y adolescentes en atención primaria y especializada" (IMSS, 2023). Según esta institución, se requiere una intervención multidisciplinaria que involucra, en primera instancia, al médico familiar, quien otorga el tratamiento o deriva al menor con especialistas en psicología, pedagogía o neurología. En la intervención pedagógica se toman en cuenta las características de la familia, del entorno, la escuela y los profesores, con el objetivo de ayudar a los niños a desarrollar habilidades de aprendizaje y que sean funcionales en los ámbitos familiar, escolar y social para que aprendan reglas de comportamiento. En aspectos psicológicos se les debe ayudar a controlar sus impulsos y poner límites en su comportamiento por medio de intervenciones conductuales, en donde se solicita la participación de padres y profesores para que den continuidad a la terapia (IMSS, 2020). El IMSS proporciona un tratamiento psicofarmacológico (medicamento) y psicoterapéutico (terapia psicológica), en estrecha coordinación entre los profesionales (médicos, psicólogos y educadores) y la familia. La decisión del fármaco que se debe utilizar tiene que tomarla el médico

junto con la familia y el paciente, teniendo en cuenta los objetivos terapéuticos de cada caso. El objetivo principal es el control de los síntomas de TDAH y su repercusión sobre el entorno familiar, escolar y social del paciente. Existen diferentes tratamientos psicoterapéuticos útiles para el tratamiento del TDAH, como el tratamiento cognitivo-conductual, las técnicas de relajación, el apoyo psicopedagógico y las intervenciones psicoeducativas familiares (IMSS, 2023).

En México, a través del (PRODEP, 2023) Educación Básica, se realizan capacitaciones al personal de Docentes y Técnicos Docentes para aplicar una intervención educativa en casos de TDAH. El personal debe conocer los signos que presenta un alumno con esta neurodivergencia para canalizarlo y con base en ello diseñar una planeación didáctica pertinente y coordinada con el proceso de evaluación, así como estrategias didácticas contextualizadas.

2. Plataformas de diagnóstico del TDAH

En la actualidad la mitigación a esta problemática es de interés en el campo científico y tecnológico, actualmente las tendencias tecnológicas aplicadas como apoyo al diagnóstico están basadas en técnicas de Inteligencia Artificial (IA) como son el Aprendizaje Automático (AA) y Aprendizaje Profundo (AP) mediante la obtención de datos desde diferentes orígenes (Imágenes de resonancia magnética, señales fisiológicas, cuestionarios, juegos, test de rendimiento, movimiento y multimodal). Adicionalmente otras formas de detección utilizan datos de Pupilometría, Twitter, Magnetoencefalografía (MEG) y genética (Loh *et al.*, 2022).

Las últimas investigaciones hacen uso de modelos de AA como una herramienta complementaria conveniente para ayudar a los médicos en sus decisiones de diagnóstico. Un estudio científico reciente mediante descomposición y técnicas no lineales con señales de Electroencefalograma (EEG) ha aplicado un clasificador K-Nearest Neighbor (KNN) utilizando datos privados de una muestra de 123 niños, con una frecuencia de muestreo de 500, un valor de 10 para validación cruzada k-fold, logrando una mayor precisión del 97,88 % con el algoritmo KNN (Tor *et al.*, 2021). Otro estudio similar de AA utilizó datos públicos OMEGA con una muestra de 25 TDAH y 25 de control con una extracción de características de coherencia y una frecuencia de muestro de 2,400, la investigación aplicó Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) con una validación cruzada dejando un sujeto fuera (LOSOVC) y obteniendo una precisión de 92.7 (Hamedí *et al.*, 2022). Por otro lado, algunos de los estudios utilizando AP se han centrado en la integración de Redes Neuronales Convolucionales (del inglés, CNN) como parte de la detección del TDAH. Recientemente un estudio aplicando la muestra pública ADHD-200 conformada con Imágenes de Resonancia Magnética (del inglés, MRI) de 351 pacientes con TDAH y 430 como grupo de control, uso la extracción de características a través de la Conectividad Funcional (del inglés, FC) y un valor de 5 para validación cruzada k-fold, logrando una precisión de 72.9 (Peng *et al.*, 2021b). Otra investigación combinó las CNN con una Red Neuronal Recurrente (del inglés, RNN) usando la misma muestra pública del estudio citado anteriormente, utilizando solo sobre el entrenamiento las imágenes

sin procesar la cual logró una precisión del 98.2 (Khullar *et al.*, 2021).

3. Protocolos de tratamiento: NFB y BFB

En el ámbito de la atención médica, se han desarrollado protocolos de tratamiento no invasivos que prescinden del uso de fármacos para abordar diversas patologías, entre los que destacan la biorretroalimentación (BFB) y la neuroretroalimentación (NFB). La distinción fundamental entre ambos protocolos radica en que la BFB emplea la monitorización de señales biológicas periféricas (frecuencia cardíaca y presión sanguínea) para entrenar la autorregulación de funciones involuntarias mediante retroalimentación en tiempo real. Por lo contrario, el NFB utiliza electroencefalografía para medir en vivo la actividad eléctrica cerebral y entrenar al paciente a modificar selectivamente patrones de oscilaciones neuronales asociados a psicopatología. Mientras la BFB permite a pacientes alterar respuestas fisiológicas periféricas, el NFB busca regular directamente el sistema nervioso central mediante modulación operante de ritmos cerebrales específicos. Por lo anterior, la distinción clave radica en que la BFB entrena control fisiológico periférico, mientras que el NFB entrena control sobre la actividad cerebral misma (Srabani Banerjee, 2017). La BFB con la realidad virtual (VR) permite controlar los distractores, proporcionando un entorno que capta la atención de los participantes. Se han realizado estudios con el propósito de evaluar los efectos de la BFB mediante el uso de EEG con RV en el tratamiento de los déficits de vigilancia (evaluados mediante el uso de la forma abreviada de la Tarea del Reloj de Mackworth), la búsqueda visual (la Tarea de Búsqueda Visual) y la atención dividida (Evaluación Multitarea). Los datos sujetos a análisis se recopilaron de 87 participantes de entre 9 y 15 años. Los niños fueron asignados a uno de tres grupos (BFB 2D estándar en el laboratorio, BFB-VR con una escena visual limitada, BFB-VR con una escena visual compleja) y fueron sometidos a diez sesiones de BFB-EEG. Los niños en los grupos de BFB-VR exhibieron una mayor pendiente de oxigenación sanguínea cerebral regional y un mejor desempeño en las pruebas cognitivas después del experimento en comparación con los niños en el grupo de BFB 2D. Los datos que se obtuvieron sugieren que la BFB-EEG con VR puede tener un efecto más beneficioso en el tratamiento de los déficits de atención en comparación con la BFB-EEG 2D estándar. Según esta investigación se cree que los fuertes efectos de BFB por medio de EEG con VR provienen del mayor compromiso y motivación de las personas, más que de la manipulación con respecto a la complejidad de la escena visual (Skalski *et al.*, 2021).

El NFB implica enseñar a las personas a regular su actividad cerebral, y una investigación buscó evaluar su influencia en la función ejecutiva y el estado de ánimo en individuos sin trastornos. Se realizaron entrenamientos de un solo día, enfocándose en el predominio de las ondas beta y la inhibición de las ondas theta, con un grupo de 30 estudiantes universitarias divididas en tres: hemisferio derecho, hemisferio izquierdo y control. Se observaron mejoras significativas en la función ejecutiva en el grupo del hemisferio derecho y cambios tendenciales en las ondas beta del EEG después del entrenamiento. Además, se encontraron correlaciones significativas entre el rendimiento eje-

cutivo, el estado de ánimo negativo, y la banda de frecuencia theta. Estos hallazgos sugieren que el protocolo puede mejorar la función ejecutiva, y que la disminución de ondas theta podría influir positivamente en la reducción del estado de ánimo negativo (Vasquez *et al.*, 2015). En otra investigación, se presentó un Sistema de Entrenamiento de NFB Neuronal que utiliza una metodología centrada en el usuario para mejorar los niveles de atención y relajación de meditadores. Se implementaron estímulos visuales, sonoros y olfativos para proporcionar retroalimentación en tiempo real. Se llevaron a cabo mediciones de niveles de atención y relajación en nueve participantes durante sesiones de meditación, utilizando una diadema Neurosky EEG. Los resultados indicaron que la NFB a través de estímulos visuales incrementó los niveles de atención en un 11.8 para el 78 % de los participantes, en comparación con sesiones sin estímulos. La NFB de estímulos sonoros aumentó los niveles de relajación en un 16 % para el 44.4 % de los participantes. Estos hallazgos ofrecen perspectivas para el diseño de interfaces de NFB neuronal en el contexto del entrenamiento de meditación, aunque se requiere una investigación adicional con una muestra más amplia para validar estos resultados (Nieto-Vallejo *et al.*, 2021).

3.1. Pupilometría

Los datos pupilométricos son otra fuente para la detección del TDAH, un estudio de (Das y Khanna, 2021) reportó que el sistema de norepinefrina del cerebro está asociado con la dinámica del tamaño de la pupila que se encuentra alterada en los pacientes con TDAH, la investigación propuso un marco robusto basado en el aprendizaje automático que analizó la dinámica del tamaño de la pupila como biomarcador objetivo para la detección automatizada del TDAH, el marco de trabajo integró una tubería integral de visualización e ingeniería de características pupilométricas con algoritmos de clasificación binaria de última generación y selección de características univariadas.

Se ha demostrado que los pacientes con TDAH (sin medicación) tienen un diámetro pupilar reducido cuando realizan tareas de memoria de trabajo visoespacial en comparación con otros pacientes (Chaccour *et al.*, 2017) Una investigación realizó una validación clínica de la vergencia ocular como marcador objetivo para diagnóstico del TDAH, se evaluó el ángulo de la vergencia de niños (n=43) previamente diagnosticados con TDAH mientras realizaba una tarea de compresión y se comparó los resultados con controles clínicos de la misma edad (n=19) y compañeros sanos (n=30), los resultados reportaron fuertes respuestas de vergencia en participantes sanos y vergencia débil en clínico, los niños con TDAH no mostraron signos de vergencia significativa, la aplicación de modelos de aprendizaje automático clasificaron a los pacientes con TDAH (n=21) de controles sano (n=21) con una presión de 9.3 % se concluyó que la combinación con una tarea de atención, las respuestas de vergencia pueden usarse como un marcador objetivo para detectar el TDAH en niños (Varela Casal *et al.*, 2019)

4. Sistemas de Interacción Física Humano-Robot

Los sistemas de interacción física humano-robot (HRpI) han realizado contribuciones importantes en el campo de las

neurociencias aplicadas a la educación. Estos descubrimientos científicos han permitido crear aportes significativos en el diagnóstico y tratamiento de pacientes con TDAH y mejorar sus habilidades neurocognitivas con fines de rehabilitación u habilitación.

En este campo de investigación un estudio desarrolló una tarea viso-háptica inmersiva para realizar mediciones de estímulo-respuesta. Se proporcionaron señales visuales al azar para indicar la amplitud requerida y la tolerancia de la fuerza de la punta de los dedos. Se pidió a los participantes que respondieran a las señales visuales presionando los transductores de fuerza con la punta de los dedos. La variación del tiempo de respuesta se tomó como una medida conductual de los estados de atención sostenida durante la tarea. El 50 % de los ensayos de baja variabilidad se clasificaron como el estado óptimo y los otros ensayos de alta variabilidad se clasificaron como el estado subóptimo utilizando la puntuación z a lo largo del tiempo. Se utilizó un sistema de adquisición de EEG de 64 canales para recopilar las actividades cerebrales durante las tareas. La amplitud potencial provocada por hápticos a 20 40 ms en latencia y sobre la región frontal central disminuyó significativamente en el estado óptimo. Además, la potencia de la banda alfa en los espectros de 8 13 Hz se suprimió significativamente en las regiones frontal central, temporal derecha y parietal en el estado óptimo. En conjunto, se identificó características neuroelectrofisiológicas que se asociaron con la atención sostenida durante las tareas de control de fuerza con varios dedos, que se utilizarían potencialmente en el desarrollo de sistemas de entrenamiento y detección de atención de circuito cerrado que explotan la interacción háptica (Peng *et al.*, 2021a).

En los últimos años, la robótica educativa ocupa un lugar importante en la política educativa de cada vez más lugares alrededor del mundo tanto en programas de educación formal como no formal. Así mismo, se apoya fuertemente la utilidad de esta área en educación especial para el tratamiento de los déficits de los alumnos con dificultades de aprendizaje de pacientes diagnosticados con TDAH y TEA, especialmente a nivel de inclusión estudiantil. Recientemente los investigadores han llegado a los resultados de una investigación educativa piloto realizada en un colegio de educación general donde confirmaron que los alumnos con o sin necesidades educativas, disfrutaron de su participación, se entusiasmaron con la programación y operación del robot. Los estudiantes con necesidades especiales, usaron sus habilidades, manejaron sus déficits, se socializaron y se sintieron aceptados, potenciando así su autoestima y participación de los alumnos con necesidades educativas especiales (Tleubayev *et al.*, 2019a).

Otra investigación analizó juegos como medio aplicable para trabajar con niños con discapacidades o diferencias de aprendizaje, los participantes fueron niños con parálisis cerebral, autismo y TDAH. Se recopiló datos de referencia que luego se utilizaron para análisis de datos y el del videojuego utilizado en el estudio de 3D Labyrinth. El juego consta de 10 niveles, seguidos uno tras otro, del más fácil al más difícil. El objetivo del juego es encontrar una trayectoria que lleve la pelota fuera del laberinto. El juego está diseñado con opciones para registrar diferentes valores de los que podemos extraer tres variables dependientes: el tiempo necesario para completar cada nivel, la longitud de la trayectoria y la colisión con la pared. Los dis-

positivos de método de entrada son el joystick arcade estándar y el brazalete MYO (pulsera con sensores de unidad de medida inercial) que se utilizan para mover la pelota a través de un laberinto. La pelota se mueve en cuatro direcciones y esto se logra moviendo el joystick en la dirección deseada o moviendo el brazo con el brazalete MYO. Los participantes se dividen en dos grupos, el primero es el grupo de control y el segundo es el grupo de participantes con necesidades especiales. La metodología aplicada es la Interacción hombre-máquina multimodal (HCI) para los niños seleccionados, la cual consistió en el diseño de experimentos donde se aplica Juegos Serios, que son un tipo de juegos que tienen una finalidad distinta al entretenimiento y se utilizan como intervención no farmacológica para mejorar las capacidades cognitivas como una herramienta de interacción que puede mejorar la atención y habilidades motrices de los usuarios. El escenario fue diseñado de manera que pudieran proporcionar la información deseada, siendo adecuada a usuarios con capacidades diferentes. Todos los datos necesarios para el análisis se guardan en archivos, donde cada archivo contiene datos para un participante, los números en el archivo muestran los valores de las variables dependientes y luego son procesadas y analizadas. El experimento se repite 10 veces, el participante puede mejorar los resultados. Como conclusión en base al análisis de los resultados y el proceso, nos muestran la dificultad para formar una solución genérica con método de experimentación para niños con necesidades especiales, por lo que es necesario formar un método que sea ajustable. Además, durante el juego, es necesario tener retroalimentación para motivar al participante a encontrar una solución (Vujović *et al.*, 2017).

Con el fin de disminuir los cuellos de botella como lo es la falta de maestros profesionales, la falta de atención durante los procesos de formación y la baja eficacia en el entrenamiento de la concentración, se propuso un marco de juego inmersivo humano-robot interactivo (del inglés, HRI) basado en el aprendizaje profundo para el entrenamiento de la concentración de los niños y demostró su eficacia. Su uso se llevó a cabo a través de juegos interactivos humano-robot basados en el reconocimiento de gestos. El marco del juego HRI incluyó cuatro módulos funcionales que fueron la adquisición de datos de video, modelado de reconocimiento de imágenes, un algoritmo de aprendizaje profundo (YOLOv5) y retroalimentación de información. Primero, se creó un modelo de reconocimiento de gestos que contenía 10,000 imágenes de gestos de niños, utilizando el algoritmo YOLOv5. La precisión promedio en el entrenamiento de reconocimiento fue del 98,7%. En segundo lugar, se seleccionó a 120 niños con déficit de atención (de 9 a 12 años de edad) para jugar los juegos de HRI, incluidas 60 niñas y 60 niños. En el experimento del juego HRI, se obtuvo 8,640 datos de muestra, que se normalizaron y procesaron. Los resultados, demostraron que las niñas tenían una mejor memoria visual a corto plazo y un tiempo de respuesta más corto que los niños. También la investigación reportó que los juegos HRI tenían una alta eficacia, comodidad y total libertad, lo que los hace apropiados para el entrenamiento de la concentración de los niños (Liu *et al.*, 2022).

Un ejemplo de robot sociales se describe en un estudio observacional realizado en las instalaciones de un Centro de Rehabilitación Infantil, el cual tuvo como objetivo investigar el im-

pacto de la Terapia Asistida por Robot (del inglés, RAT) en niños no verbales con forma severa de Trastorno del Espectro Autista (TEA) y TDAH. Esta investigación realizó una evaluación iterativa basada en las observaciones de tres niños y entrevistas con sus padres, así mismo se observó continuamente los comportamientos de un robot humanoide NAO que actualmente está listo para usarse en la investigación sobre la terapia asistida por robot. Se evaluó la interacción con el robot y las conductas con niños de 5 a 8 años. Se concluyó que incluso unas pocas sesiones con un robot parecían ser eficaz en la mejora de los rasgos sociales y concentración. Sin embargo, su implementación dentro de un marco de la interacción con niños con TEA y TDAH se ve desafiada con varios factores como la RAT por dicha causa se debe ofrecer juegos y robots apropiados para el comportamiento y así satisfacer las necesidades específicas de los niños para que la terapia pueda ofrecer una gran variedad de juegos para las necesidades y requerimientos de estos niños (Tleubayev *et al.*, 2019b).

5. Interfaces Cerebro-Computadora

La tecnología de Interfaces Cerebro-Computadora (BCI) ha aprovechado la información neural aplicando algoritmos de ML para diagnosticar y dar tratamiento a pacientes con TDAH. Mediante la tecnología EEG-BCI es posible medir los niveles de atención de pacientes TDAH, en investigaciones actuales se ha demostrado que los pacientes diagnosticados con esta neurodivergencia muestran niveles más bajos de atención y más variabilidad en las respuestas de atención del cerebro en comparación con un grupo de control. Este tipo de sistemas podría usarse potencialmente en entornos clínicos como una herramienta de detección temprana de rasgos atencionales para prevenir su desarrollo (Serrano-Barroso *et al.*, 2021). Otro estudio similar aplico la tecnología BCI para convertir una tarea imaginaria en un comando útil para jugar un juego diseñado para personas con déficit de atención mediante la aplicación de preprocesamiento y clasificación de datos de EEG, giroscopio y acelerómetro (Amin *et al.*, 2022). Se ha demostrado que la precisión de la clasificación de las señales de EEG se puede mejorar aún más cuando la información de dominio de frecuencia y tiempo se usa en combinación (Nason y Silverman, 1994).

En una investigación que se centró en el diseño, implementación y evaluación preliminar de Attenti-ON, un BCI híbrido para el tratamiento del TDAH basado en neurofeedback. Attenti-ON incorpora un Serious Game controlado por la estimación del nivel de atención a través de la relación entre las ondas theta y beta del electroencefalograma. Además, presenta una actividad manual destinada a concentrar la atención en la tarea cognitiva requerida. El sistema consta de una interfaz de usuario y cuatro módulos: el primero adquiere señales de electroencefalografía de electrodos prefrontales (Fp1 y Fp2) y las procesa. El segundo módulo se encarga de procesar las señales y generar comandos válidos. El tercer módulo es un Serious Game desarrollado en Unity, donde la velocidad de un avatar animado se ajusta según el nivel de atención. El último módulo, el control manual, se puede manejar mediante teclado o joystick. Se realizaron dos evaluaciones de Attenti-ON. La primera se enfocó en evaluar el rendimiento del sistema utilizando una

base de datos de señales. En la segunda, se evaluó el funcionamiento del BCI en un voluntario sano en un entorno de lazo cerrado, con el propósito de verificar si la velocidad del avatar se ajustaba al nivel de atención del voluntario, que era modificado por interferencias simuladas. Los resultados preliminares sugieren que Attenti-ON podría transferirse al ámbito clínico para su evaluación en el tratamiento del TDAH (Gonzales *et al.*, 2022).

6. Métricas y análisis de datos y señales

En la actualidad existen diversos estudios que reportan los resultados de la aplicación de métricas clínicas para asociar métodos de diagnóstico con la sintomatología del TDAH para determinar el efecto de la estimulación neurocognitiva. Al realizar este procedimiento clínico se recomienda utilizar criterios cuantitativos de alguna prueba psicométrica de atención. Es importante mencionar que las dificultades en los procesos de atención y concentración pueden afectar otras habilidades neurocognitivas (memoria, planificación y toma de decisiones). La evaluación e intervención en los procesos de atención es la base para mejorar las Habilidades Básicas del Pensamiento (lectura, escritura y cálculo).

6.1. Prueba de atención D2

En la evaluación psicológica no solamente es útil la aplicación de tests de capacidad general (inteligencia, conocimientos técnicos), sino también la de otros instrumentos que tengan como objetivo la medida de procesos básicos necesarios para tener éxito ante tareas complejas; estos procesos básicos han sido denominados con términos como atención, concentración mental, esfuerzo o control atencional (Bartenwerfer, 1983).

El test D2 pertenece a la categoría de los instrumentos que pretenden medir estos procesos básicos. En Alemania son conocidos como tests de concentración o tests de atención selectiva, y en los Estados Unidos reciben la denominación de tests de amplitud atencional, de atención selectiva o de atención sostenida (Lezak y Metz-Lutz, 1996). En particular, la atención selectiva ha sido ampliamente estudiada en la neuropsicología americana. A menudo definida como concentración, la atención selectiva puede definirse como la capacidad para centrarse en uno o dos estímulos importantes, mientras se suprime deliberadamente la consciencia de otros estímulos distractores (Zillmer *et al.*, 1998). El constructo de vigilancia o atención sostenida, con el que la atención selectiva está relacionada, se refiere a la capacidad de mantener una actividad atencional durante un periodo de tiempo (Brickenkamp y Cubero, 2002).

Esta prueba es una medida concisa de la atención selectiva y la concentración mental. El constructo de atención y concentración, tal como se utiliza en este manual, alude a una selección de estímulos enfocada de modo continuo a un resultado. La parte central de estos procesos es la capacidad de atender selectivamente a ciertos aspectos relevantes de una tarea mientras se ignoran los irrelevantes (p. ej., realizar una búsqueda selectiva) y, además, hacerlo de forma rápida y precisa. De acuerdo con esta definición, el d2 supone una actividad de concentración con respecto a estímulos visuales. Una buena concentración requiere un funcionamiento adecuado de la motivación y del control

de la atención (Brickenkamp y Cubero, 2002). Estos dos aspectos, aplicados al D2, se reflejan en tres componentes de la conducta atencional:

1. La velocidad o cantidad de trabajo, esto es, el número de estímulos que se han procesado en un determinado tiempo (un aspecto de la motivación o intensidad de atención),
2. La calidad del trabajo, esto es, el grado de precisión que está inversamente relacionado con la tasa de errores (un aspecto del control de la atención), y
3. La relación entre la velocidad y la precisión de la actuación, lo que permite establecer conclusiones tanto sobre el comportamiento como sobre el grado de actividad, la estabilidad y la consistencia, la fatiga y la eficacia de la inhibición atencional.

La primera edición del D2 se publicó en 1962. Desde entonces el test ha sufrido varias revisiones y en Alemania se han publicado 8 ediciones. Existen (además de la española) versiones en francés, portugués y danés. La primera adaptación en inglés se basa en un modelo conceptual basado en 35 años de investigación básica y clínica para mejorar su aplicación en diversos ámbitos de la Psicología; en este manual se presentan numerosos estudios que han mostrado su validez y fiabilidad. El D2 se ha mostrado útil en la investigación básica; no obstante, los datos sugieren que puede ser también útil en un amplio rango de aplicaciones prácticas, especialmente en los campos clínico, industrial y educativo. En este manual se incluye información para la aplicación, puntuación e interpretación del instrumento. También se incluye información sobre las investigaciones en las que se ha utilizado y sobre las perspectivas futuras de su utilización (Brickenkamp y Cubero, 2002).

6.1.1. Aplicaciones del test de atención D2

Una investigación examinó el espectro de potencia y exploró la conectividad/desconectividad cerebral funcional durante el desempeño de la concentración, medida con la prueba D2 de atención y creatividad medida por la prueba de Inteligencia creativa (CREA) en niños con desarrollo típico. El análisis de la conectividad cerebral mediante el uso de sincronía de fase es decir, índice de bloqueo de fase (PLI) sobre las señales de EEG adquiridas por el neuroheadset Emotiv EPOC en 15 niños de 9 a 12 años. Los resultados indicaron que la prueba D2 tuvo un aumento en la sincronización de la fase gamma global y hubo una desincronización global de las bandas alfa y theta. Por el contrario, durante la tarea CREA, el análisis del espectro de potencia mostró un aumento significativo en delta, beta, theta y bandas gamma (Bansal *et al.*, 2023).

En otra investigación un estudio aplicó el aprendizaje automático para predecir, clasificar y utilizar evaluaciones neuropsicológicas cortas, a niños con TDAH combinado (TDAH-C) aplicando Test de Atención D2 para analizar la gravedad de los síntomas, los padres participaron en los cuestionarios de los niños con TDAH-C y niños de control con desarrollo normal en la realización de entrevistas clínicas semiestructuradas y pruebas de atención/concentración. Se aplicó un enfoque directo de selección de características y un modelo de árbol de decisión para su utilización en descubrir las características neuropsicológicas e informativas para construir un modelo basado en reglas. Los jóvenes individuales con TDAH y los que no lo

tienen, fueron clasificados con precisión notable (100 %) usando el modelo Máquina de Vectores de Soporte (SVM) (1.0). Individuos con TDAH-C y aquellos que no tienen se diagnosticaron con un 100 % de sensibilidad y especificidad utilizando algoritmos de árboles de decisión (Suárez-Manzano *et al.*, 2023).

Un estudio analizó la posible asociación de la fuerza muscular de tren inferior, abdominal y manual con la atención, el comportamiento hiperactivo-desatento en el aula, el cálculo matemático y el razonamiento lingüístico en niños y niñas diagnosticados con TDAH. La muestra estaba formada por 94 estudiantes TDAH (50 niñas y 44 niños, 53 % y 47 % respectivamente) de 9.48 a 12.10 años. La atención se midió con el Test de atención D2, para el comportamiento hiperactivo-impulsivo en el aula se utilizó la prueba Escala para la Evaluación del TDAH y para evaluar el cálculo matemático y razonamiento lingüístico se emplearon dos test ad hoc. Los resultados han mostrado que en niños existe una asociación negativa entre el nivel de fuerza abdominal y manual con la presencia de comportamiento hiperactivo desatento en el aula ($p=0.001$ y $p=0.009$, respectivamente). En niñas, una mayor fuerza de tren inferior se asoció con mayores niveles de atención ($p=0.042$) y la fuerza manual se relacionó positivamente en el razonamiento lingüístico ($p=0.019$) (Mateos *et al.*, 2022).

6.2. Test de Go/No-Go

Las tareas Go-No Go son ejercicios en los que se exponen una serie de estímulos a los que se debe responder, o no, de una determinada manera, que no siempre es lo habitual o lo esperado (Castañeda, 2022), por ejemplo, cuando salga una mano tocarse un pie. La edad recomendada para la aplicación del test es a partir de 6 años. Este paradigma requiere que los individuos ejecuten una respuesta motora (Go) con respecto a una señal, mientras se inhibe dicha respuesta en consecuencia a otra señal (Brophy *et al.*, 2002), (Thorell *et al.*, 2004).

6.2.1. Aplicaciones del test Go/No-Go

Un equipo de investigadores hicieron un análisis de la tarea Go/No-go para medir la capacidad de mantener la atención y el control de la respuesta. En esta investigación se aplicó la tarea Go/No-go computarizada usando un software integrado del analizador de EEG (Telescan, LAXTHA). Durante la tarea Go/No-go, a cada participante se le indicó que presionara un botón para un estímulo frecuente (es decir, estímulo Go), o que retuviera una respuesta para un estímulo poco frecuente es decir, estímulo No-go, 40 de porcentaje de probabilidad. El EEG se midió a partir de 31 electrodos Ag/Ag-CL, colocados de acuerdo con un Sistema Internacional 10-20 aumentado. Todos los registros de EEG se referenciaron al promedio de la mastoides derecha e izquierda y el electrodo de tierra se colocó en el sitio del electrodo Fz. La actividad del electrooculograma se registró a partir de electrodos colocados por debajo y por encima del ojo izquierdo y electrodos ubicados en el centro exterior de ambos ojos. Todos los electrodos se mantuvieron a impedancias <10 k Ω antes del registro de datos. Después de completar la recopilación de datos, las señales de EEG se analizaron utilizando un software (Telescan; LAXTHA); el filtro de paso de banda del amplificador era de 0,5 a 20 Hz, la frecuencia

de muestreo era de 1000 Hz y el filtro de muesca era de 60 Hz (Ji *et al.*, 2023).

6.3. Tarea de Ejecución Continua

La tarea de ejecución continua (CPT, por sus siglas en inglés: Continuous Performance Test) es una prueba psicológica que evalúa dos de los síntomas primordiales del Trastorno por Déficit de Atención (TDA): la inatención y la impulsividad (Reyes-Zamorano *et al.*, 2003).

6.3.1. Aplicaciones de CPT

El EEG cuantificado ha demostrado ser también una herramienta útil en la evaluación del TDAH. Sin embargo, no existe estudio alguno que analice la posible correlación presente entre estas dos técnicas de evaluación. Un grupo de investigadores (Reyes-Zamorano *et al.*, 2003) tuvo como objetivo analizar la correlación entre las diferentes variables del CPT y la actividad eléctrica cerebral. Se correlacionaron los valores de la potencia absoluta en las bandas delta, theta, alfa y beta, con el número de omisiones, comisiones, el tiempo de reacción, el indicador de estilo de respuesta y el índice de confiabilidad, en 35 niños con TDA. Se obtuvieron correlaciones significativas que se agruparon en dos patrones diferentes: 1) las omisiones se correlacionaron positivamente con la actividad alfa en las zonas temporales y frontales inferiores, 2) el resto de las medidas se correlacionaron positivamente (excepto en el caso de las comisiones cuyas correlaciones fueron negativas) con la actividad theta generalizada. Estos resultados sugieren que la actividad eléctrica de base tiene relación con los procesos medidos por el CPT, además de que muestra un patrón característico del TDA (Reyes-Zamorano *et al.*, 2003).

6.4. Test de Variables de Atención

La Prueba de Variables de Atención (TOVA) es una prueba de rendimiento continuo que evalúa la atención, la impulsividad y la velocidad de procesamiento. TOVA ha sido aprobado por la Administración de Medicamentos y Alimentos de EE. UU. (del inglés, FDA) para facilitar la evaluación de los déficits de atención y evaluar los efectos de las intervenciones en el TDAH (Barakat *et al.*, 2023). Las normas de esta prueba se basan en una administración matutina y cualquier TOVA administrado después de la 1:00 p. m. se marca como potencialmente no válido (Hunt *et al.*, 2012).

6.4.1. Aplicaciones de TOVA

Las pruebas de rendimiento continuo TOVA son importantes para evaluar procesos de atención en entornos clínicos, aunque ha habido estudios previos sobre los efectos de las emociones en estas pruebas, los resultados previos son limitados y en ocasiones contradictorios. La investigación actual ha tenido como objetivo de estudio, explorar la correlación entre el desempeño en el TOVA y los síntomas emocionales informados por los padres en la juventud. Y en el análisis de un conjunto de datos preexistentes del Cuestionario de Estado de Ánimo y Sentimientos, la Evaluación de Trastornos Relacionados con la Ansiedad Infantil y la Escala de Calificación Diagnóstica del TDAH de Vanderbilt, como resultados preexistentes de la prueba TOVA de 216 pacientes con edades comprendidas entre 8 y

18 años. Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson, así como modelos de regresión lineal, para examinar la asociación entre los síntomas depresivos y de ansiedad y los cuatro índices de TOVA (variabilidad del tiempo de respuesta, tiempo de respuesta, errores de comisión y errores de omisión). Además, se utilizó ecuaciones de estimación generalizadas para determinar si los síntomas emocionales informados afectan el resultado TOVA de manera diferente a medida que avanza la prueba. Como resultados de TOVA no parecen verse afectados por los síntomas emocionales en la juventud. Se ha concluido que los estudios futuros también deberían explorar otros factores que pueden afectar el rendimiento en el TOVA, como la discapacidad motora, la somnolencia o los trastornos del desarrollo neurológico que afectan las capacidades cognitivas (Barakat *et al.*, 2023).

En un estudio controlado llamado STARS-ADHD, aleatorizado, doble ciego, de grupos paralelos realizado en 20 instituciones de investigación en los EE.UU. desde el 15 de julio de 2016 hasta el 30 de noviembre de 2017. Se aplicó TOVA el test que es una prueba de rendimiento continuo, informatizada y validada que mide objetivamente la atención y el control inhibitorio, normalizados por edad y sexo. Se evaluaron 857 pacientes y se asignó aleatoriamente a 348 para recibir AKL-T01 o control. Entre los pacientes que recibieron AKL-T01 ($n=180$ [52 %]; edad media [Desviación estándar (DE)], 9.7 [1.3] años) o control ($n=168$ [48 %]; edad media [DE], 9.6 [1.3] años), la estimación no paramétrica del cambio mediano de la población desde el inicio del TOVA API fue 0.88 (IC del 95 %: 0.24–1.49; $p = 0.0060$). El cambio medio (DE) desde el inicio en el TOVA API fue de 0.93 (3.15) en el grupo AKL-T01 y 0.03 (3.16) en el grupo de control. No hubo eventos adversos graves ni interrupciones. Los eventos adversos relacionados con el tratamiento fueron leves e incluyeron frustración (5 [3 %] de 180) y dolor de cabeza (3 [2 %] de 180). El cumplimiento del paciente fue una media de 83 (83 %) de 100 sesiones esperadas realizadas (DE, 29.2 sesiones). La medida de resultado primaria fue el cambio medio en el TOVA API desde antes de la intervención hasta después de la intervención. Los resultados y conclusiones fueron que, aunque se necesitan investigaciones futuras para esta intervención digital, podría usarse AKL-T01 para mejorar la falta de atención medida objetivamente en pacientes pediátricos con TDAH (Kollins *et al.*, 2020).

7. Algoritmos de Inteligencia Artificial para diagnóstico

Los algoritmos frecuentemente utilizados para clasificar datos utilizando la tecnología EEG-BCI han sido Support-vector machines (SVM) en combinación con otros como son k-Nearest Neighbor (kNN), Decision Tree y Long Short-Term Memory (LSTM) (Amin *et al.*, 2022). El algoritmo SVM es un tipo de ML supervisado y está diseñado para problemas de regresión y clasificación (Chandra y Bedi, 2021), aprende con el ejemplo a asignar etiquetas a objetos. Es una secuencia de instrucciones para maximizar una función matemática particular con respecto a una colección dada de datos (Boser *et al.*, 1992). Es una técnica de clasificación discriminativa para relaciones lineales y no lineales. Utiliza una función kernel para transformar matemáticamente cada punto de datos en un espacio de características de

mayor dimensión para que un hiperplano (plano geométrico de alta dimensión) separe los grupos (Rattan *et al.*, 2022).

Se ha demostrado en investigaciones que el algoritmo kNN es una herramienta eficaz para discriminar entre TDAH y no TDAH, por lo tanto, se han creado varios modelos kNN diferentes utilizando características derivadas en una variedad de formas (Hanson, 2018). Es un modelo de clasificación no paramétrico que utiliza la distancia euclidiana desde las etiquetas de verdad del terreno para clasificar nuevos datos. A menudo se puede utilizar para el etiquetado provisional como parte de un modelo de aprendizaje semisupervisado (Rattan *et al.*, 2022).

El Árbol de Decisión (DT) para la Evaluación y Manejo del TDAH, es un diagrama de flujo con pasos de decisión para médicos a tener en cuenta al evaluar e intervenir con un niño que presenta síntomas de TDAH (Magyary y Brandt, 2002). Un DT es una técnica de modelado simple, pero versátil, que utiliza varios niveles de puntos de decisión ramificados (nodos) basados en valores de características que terminan en agrupaciones de nodos terminales llamados hojas. La simplicidad permite una interpretación sencilla y una selección de características, pero es difícil modelar relaciones complejas (Rattan *et al.*, 2022).

El algoritmo LSTM se ha utilizado para diferenciar niños con TDAH y niños neurotípicos (NT). En un estudio realizado con un total de 30 niños NT y 30 niños con TDAH mientras participaron se monitoreaban simultáneamente con EEG. Los resultados reportaron que se trató de una característica única de potencia beta en la ubicación del electrodo de O2, el segmento de datos óptimo fue el mismo, un segmento de EEG que contiene los datos de 30 segundos de descanso con los ojos abiertos y 30 segundos de la tarea. Esto produjo un rendimiento mejorado para distinguir las diferencias en EEG entre los dos grupos, ayudando así en el diagnóstico de TDAH (Huang *et al.*, 2022).

En una encuesta sobre Aprendizaje Profundo en datos de señales fisiológicas se reportó que, en el reconocimiento del movimiento de la mano, los modelos CNN y CNN+RNN se aplican con mayor frecuencia. En el reconocimiento de la actividad muscular, el modelo CNN es el más utilizado (Rim *et al.*, 2020). La CNN es el tipo de modelo de aprendizaje profundo más exitoso para el análisis de imágenes 2D, como el reconocimiento, la clasificación y la predicción. CNN recibe datos 2D como entrada y extrae características de alto nivel a través de muchas capas de convolución ocultas. Por lo tanto, para alimentar señales fisiológicas en un modelo CNN, algunos trabajos de investigación han convertido señales 1D en datos 2D (Zhang *et al.*, 2019). El modelo CNN+RNN proporciona mayor precisión que el modelo CNN. El modelo DBN funciona mejor que los modelos CNN y CNN+RNN. Finalmente, se concluye que el modelo CNN funciona mejor que el modelo RNN/LSTM (Rim *et al.*, 2020).

8. Conclusiones

En la revisión de la literatura presentada se promueve la idea de diversas soluciones tecnológicas para diagnóstico y tratamiento del TDAH, se perfilan como un avance prometedor en la atención médica y el bienestar de los pacientes. La combinación de HRpI y BCI proporciona una plataforma de diagnóstico y tratamiento altamente personalizada. La pupilometría, junto

con la NFB y BFB, permite una evaluación precisa y no invasiva de los síntomas del TDAH. La implementación de la IA a través de las diversas técnicas de ML y DL potencia la capacidad de diagnóstico y seguimiento a través del análisis de métricas y señales fisiológicas obtenidas por EEG, incluyendo pruebas como el Test de Atención D2, Go/No-go, CPT y TOVA.

La integración de tecnologías emergentes como herramientas de apoyo al diagnóstico y tratamiento representa un hito en la atención médica de esta neurodivergencia. Es fundamental resaltar que el objetivo principal de la intervención terapéutica radica en la autorregulación del individuo, especialmente en los aspectos verbales de la vida diaria. El propósito final de la terapia es que el niño internalice habilidades de autorregulación en su rutina diaria, específicamente en contextos verbales. La utilización de estas tecnologías, como se discute en esta investigación, se presenta como una vía favorable para el entrenamiento en autorregulación y su aplicación en situaciones cotidianas. Una solución integral que aborde los desafíos de métodos de diagnóstico y tratamiento del TDAH, permitirá mejorar la calidad de vida de los pacientes y ofrecer una perspectiva alentadora para el futuro de la atención médica en este campo interdisciplinario.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo de beca para estudios doctorales con No. 819494. El segundo autor agradece el fortalecimiento del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII) del CONAHCYT.

Referencias

- Amin, M., Tubaishat, A., Al-Obeidat, F., Shah, B., y Karamat, M. (2022). Leveraging akrcrain-computer interface for implementation of a bio-sensor controlled game for attention deficit people. *Computers and Electrical Engineering*, 102:108277. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108277>.
- Bansal, H., Jaiswal, S., Agarwal, S., y Noida, G. (2023). Brain data visualization and prediction of adhd disease I. 12(4):1420–1445.
- Barakat, M., Ezzeddine, R., Mohsen, H., y Shamseddeen, W. (2023). Impact of Emotions on Test of Variables of Attention(TOVA) Performance in a Pediatric Clinical Population: A Retrospective Study. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 38(7):1047–1053. <https://doi.org/10.1093/arclin/acad023>.
- Barkley, R. A. (2006). *Attention-Deficit Hyperactivity Disorder: A Handbook for Diagnosis and Treatment*. Guilford Press, New York.
- Bartenwerfer, H. (1983). *Allgemeine Leistungsdiagnostik. Intelligenz-und Leistungsdiagnostik. Bd. 2*.
- Bitsko, R. H. (2022). Mental Health Surveillance Among Children — United States, 2013–2019. 71(2):1–42. <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/71/su/su7102a1.htm#contribAff>.
- Boser, B. E., Guyon, I. M., y Vapnik, V. N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. En *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, pp. 144–152.
- Brickenkamp, R. y Cubero, N. S. (2002). *D2: test de atención*. Tea.
- Brophy, M., Taylor, E., y Hughes, C. (2002). To Go or Not To Go: Inhibitory Control in ‘Hard to Manage’ Children. *Infant and Child Development*, 18(6):238–254.
- Castañeda, T. (2022). Tareas de control cognitivo Simon Task: revisión crítica - Cognitive Control Tasks Simon Task: Critical Review. *Journal of Science, Humanities and Arts - JOSHA*, 9(2).
- Chaccour, Carlos J and Hammann, Felix and Alustiza, Marta and Castejon, Sandra and Tarimo, Brian B and Abizanda, Gloria and Irigoyen Barrio, Ángel and Martí Soler, Helena and Moncada, Rafael and Bilbao, José Ignacio and others (2017). Cytochrome p450/abc transporter inhibition simultaneously enhances ivermectin pharmacokinetics in the mammal host and pharmacodynamics in anopheles gambiae. 7(1):8535.
- Chandra, M. A. y Bedi, S. (2021). Survey on svm and their application in image classification. *International Journal of Information Technology*, 13:1–11.
- Das, W. y Khanna, S. (2021). A robust machine learning based framework for the automated detection of adhd using pupillometric biomarkers and time series analysis. *Scientific reports*, 11(1):16370.
- de Sánchez, M. A. (1995). Desarrollo de Habilidades de Pensamiento. En *Procesos básicos del pensamiento*, p. 29. Trillas, ITESM, México, 2 edición. <https://www.uv.mx/personal/cavalerio/files/2011/09/HABILIDADES-BASICAS-DE-PENSAMIENTO1.pdf>.
- Gonzales, C. B. A., Muñoz, A., Müller, P. P., Carrere, L. C., y Tabernig, C. B. (2022). A hybrid bci for neurofeedback-based attention training: design and preliminary evaluation. *IEEE Latin America Transactions*, 20(5):746–752.
- Guevara, G. (2000). Draft 1, Habilidades Básicas [Paráfrasis], (Manuscrito no publicado). *México: Facultad de Filosofía, UV*.
- Hamedí, N., Khadem, A., Delrobaei, M., y Babajani, F. A. (2022). Detecting ADHD based on brain functional connectivity using resting-state MEG signals.
- Hanson, S. E. (2018). Classification of adhd using heterogeneity classes and attention network task timing.
- Huang, I.-W., Chang, Y., Stevenson, C., Chen, I.-C., Lin, D.-S., y Ko, L.-W. (2022). Optimal eeg data segmentation in lstm networks for learning neural dynamics of adhd. pp. 033–038.
- Hunt, M. G., Bienstock, S. W., y Qiang, J. K. (2012). Effects of diurnal variation on the Test of Variables of Attention performance in young adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Psychological Assessment*, 24(1):166–172.
- IMSS (2020). Durante el confinamiento, es fundamental que los menores con TDAH realicen actividades en casa y sean constantes con sus medicamentos. <http://www.imss.gob.mx/prensa/archivo/202007/473>.
- IMSS (2023). Trastornos por déficit de atención e hiperactividad. <http://www.imss.gob.mx/salud-en-linea/infografias/tdah>.
- ISSSTE (2022). Tratamiento oportuno de TDAH reduce riesgo de maltrato y adicciones: ISSSTE. <https://www.gob.mx/issste/prensa/tratamiento-oportuno-de-tdah-reduce-riesgo-de-maltrato-y-adicciones-issste?idiom=es>.
- Ji, HongQing and Wu, Shanshan and Won, Junyeon and Weng, Shiyang and Lee, Sujin and Seo, Sangmin and Park, Jung-Jun and others (2023). The effects of exergaming on attention in children with attention deficit/hyperactivity disorder: Randomized controlled trial. *JMIR Serious Games*, 11(1):e40438.
- Khullar, V., Salgotra, K., Singh, H. P., y Sharma, D. P. (2021). Deep learning-based binary classification of ADHD using resting state MR images. *Augmented Human Research*, 6(1):5.
- Kollins, S. H., Deloss, D. J., Cañadas, E., Lutz, J., Findling, R. L., Keefe, R. S. E., Epstein, J. N., y Cutler, A. J. (2020). Articles A novel digital intervention for actively reducing severity of paediatric ADHD (STARS-ADHD): a randomised controlled trial. pp. 168–178.
- Lezak, M. y Metz-Lutz, M. (1996). Neuropsychological assessment 3e edition. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, 26(2):120–121.
- Liu, L., Liu, Y., Gao, X.-Z., y Zhang, X. (2022). An immersive human-robot interactive game framework based on deep learning for children’s concentration training. 10(9):1779.
- Loh, H. W., Ooi, C. P., Barua, P. D., Palmer, E. E., Molinari, F., y Acharya, U. R. (2022). Automated detection of ADHD: Current trends and future perspective. *Computers in Biology and Medicine*, 146(March):105525. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2022.105525>.
- Magyary, D. y Brandt, P. (2002). A decision tree and clinical paths for the assessment and management of children with adhd. *Issues in mental health nursing*, 23(6):553–566.
- Mateos, D. M., Krumm, G., Arán Filippetti, V., y Gutierrez, M. (2022). Power spectrum and connectivity analysis in eeg recording during attention and creativity performance in children. *NeuroSci*, 3(2):347–365.
- Nason, G. P. y Silverman, B. W. (1994). The discrete wavelet transform in s. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 3(2):163–191.
- National Center on Birth Defects and Developmental Disabilities (NCBDDD) (2023). Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD). <https://www.cdc.gov/ncbddd/adhd/index.html>.
- Nemours, K. y Hasan, S. (2020). ADHD and School. <https://kidshealth.org/en/parents/adhd-school.html>. Retrieved: 2023-04-22.
- Nieto-Vallejo, A.-E., Ramírez-Pérez, O.-F., Ballesteros-Arroyave, L.-E., y Aragón, A. (2021). Design of a neurofeedback training system for medi-

- tation based on eeg technology. *Revista Facultad de Ingeniería*, 30(55).
- NIMH (2021). El trastorno de déficit de atención con hiperactividad en los niños y los adolescentes: Lo que usted debe saber. pp. 1–6. <https://www.nimh.nih.gov/sites/default/files/documents/health/publications/espanol/21-MH-8159S.pdf>.
- Peng, C., Peng, W., Feng, W., Zhang, Y., Xiao, J., y Wang, D. (2021a). Eeg correlates of sustained attention variability during discrete multi-finger force control tasks. *IEEE Transactions on Haptics*, 14(3):526–537.
- Peng, J., Debnath, M., y Biswas, A. K. (2021b). Efficacy of novel Summation-based Synergetic Artificial Neural Network in ADHD diagnosis. *Machine Learning with Applications*, 6(January):100120. <https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100120>.
- PRODEP (2023). Dirección general de formación continua a docentes y directivos. <https://dgfcdd.sep.gob.mx/prodep>.
- Rattan, P., Penrice, D. D., y Simonetto, D. A. (2022). Artificial intelligence and machine learning: what you always wanted to know but were afraid to ask. *Gastro Hep Advances*, 1(1):70–78.
- Reyes-Zamorano, E., Ricardo-Garcell, J., y Villa, G. G., Cortes, J., y Otero, G. (2003). Los procesos de la atención y el electroencefalograma cuantificados en un grupo de pacientes con trastorno por déficit de atención. *Salud Mental*, 26(1):11–22.
- Rim, B., Sung, N.-J., Min, S., y Hong, M. (2020). Deep learning in physiological signal data: A survey. *Sensors*, 20(4):969.
- Rojas, D. y Gutiérrez, L. (2021). TDAH: Otra problemática que le ha quedado grande a la SEP. <https://www.ladobe.com.mx/2021/02/tdah-otra-problematika-que-le-ha-quedado-grande-a-la-SEP/>.
- SEP (2015). Orientaciones para el establecimiento del sistema de alerta temprano en escuelas de educación básica. pp. 1–40. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/263956/Manual_Orientaciones_SisAT.pdf.
- SEP (2019). El camino para construir la Nueva Escuela Mexicana. pp. 4–6.
- SEP (2023). Orientaciones para el establecimiento del sistema de alerta temprana en escuelas de educación básica. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/263956/Manual_Orientaciones_SisAT.pdf.
- Serrano-Barroso, A., Siugzdaitė, R., Guerrero-Cubero, J., Molina-Cantero, A. J., Gomez-Gonzalez, I. M., Lopez, J. C., y Vargas, J. P. (2021). Detecting attention levels in adhd children with a video game and the measurement of brain activity with a single-channel bci headset. *Sensors*, 21(9):3221.
- Skalski, S., Konaszewski, K., Pochwatko, G., Balas, R., y Surzykiewicz, J. (2021). Effects of hemoencephalographic biofeedback with virtual reality on selected aspects of attention in children with ADHD. *International Journal of Psychophysiology*, 170:59–66. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167876021008977>.
- Srabani Banerjee, C. A. (2017). Neurofeedback and Biofeedback for Mood and Anxiety Disorders : A Review of Clinical Effectiveness and Guidelines. pp. 1–26.
- Suárez-Manzano, S., Magdaleno, A. R., Martínez, J. L. S., y Loureiro, V. (2023). Asociación de la fuerza muscular con atención, comportamiento hiperactivo-desatento, cálculo matemático y razonamiento lingüístico en escolares diagnosticados tdah. *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, (47):753–760.
- Thorell, L., Bohlin, G., y Rydell, A.-M. (2004). Two types of inhibitory control: Predictive relations to social functioning. *International Journal of Behavioral Development*, 28(3):193–203.
- Tleubayev, B., Zhexenova, Z., Zhakenova, A., y Sandygulova, A. (2019a). Robot-assisted therapy for children with adhd and asd: A pilot study. En *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Service Robotics Technologies*, pp. 58–62.
- Tleubayev, B., Zhexenova, Z., Zhakenova, A., y Sandygulova, A. (2019b). Robot-assisted therapy for children with adhd and asd: A pilot study. En *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Service Robotics Technologies*, ICSRT 2019, p. 58–62, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3325693.3325703>.
- Tor, H. T., Ooi, C. P., Lim-Ashworth, N. S. J., Wei, J. K. E., Jahmunah, V., Oh, S. L., Acharya, U. R., y Fung, D. S. S. (2021). Automated detection of conduct disorder and attention deficit hyperactivity disorder using decomposition and nonlinear techniques with EEG signals. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 200:105941.
- Varela Casal, Paloma and Lorena Esposito, Flavia and Morata Martínez, Imanol and Capdevila, Alba and Solé Puig, Maria and de la Osa, Núria and Ezpeleta, Lourdes and Perera i Lluna, Alexandre and Faraone, Stephen V and Ramos-Quiroga, Josep Antoni and others (2019). Clinical validation of eye vergence as an objective marker for diagnosis of adhd in children. *Journal of attention disorders*, 23(6):599–614.
- Vasquez, M., Gadea, M., Garijo, E., Aliño, M., y Salvador, A. (2015). Effects of assisted training with neurofeedback on eeg measures, executive function and mood in a healthy sample. *Anales de Psicología/Annals of Psychology*, 31(1):317–323.
- Vujović, M., Perales, F. J., y Coll, M. C. (2017). Serious games – tool for human computer interaction for children with special needs. *June*.
- WHO, T. R. S. (2021). The Selection and Use of Essential Medicines. <http://www.infocoonline.es/pdf/9789240041134-eng.pdf>.
- World Health Organization (2019). Attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Regional Office for the Eastern Mediterranean*. https://applications.emro.who.int/docs/EMRPUB_leaflet_2019_mnh_214_en.pdf.
- Zhang, D., Yao, L., Chen, K., Wang, S., Chang, X., y Liu, Y. (2019). Making sense of spatio-temporal preserving representations for eeg-based human intention recognition. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(7):3033–3044.
- Zillmer, E., Spiers, M., y Culbertson, W. (1998). Principles of clinical neuropsychology. *Pacific Grove: CA: Brooks/cole*.