

USO DE ENTORNOS VIRTUALES PARA TRASTORNOS DEL NEURODESARROLLO: UNA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y AGENDA FUTURA

MARIANO L. ALCAÑIZ¹, ELENA OLMOS-RAYA^{1, 2}, LUIS ABAD²

¹Instituto de Investigación e Innovación en Bioingeniería (i3), Universidad Politécnica de Valencia,

²Centro de Desarrollo Cognitivo Red Cenit, Valencia, España

Resumen Hasta ahora las herramientas diagnósticas de los trastornos del espectro autista (TEA) se basan mayoritariamente en criterios cualitativos de información observacional en contextos con baja validez ecológica. Una creciente actividad científica propone medidas implícitas para la evaluación y diagnóstico del TEA. Dichas medidas se basan en procesos de carácter biológico e inconsciente, subyacentes a la capacidad de cognición humana y son obtenidas a través de la adquisición y tratamiento de respuestas cerebrales, fisiológicas y comportamentales, con el objetivo de obtener la estructura comportamental del paciente TEA ante un estímulo. La compleja relación existente entre respuestas fisiológicas y la estructura comportamental del paciente TEA ante un estímulo, obliga a utilizar técnicas avanzadas de tratamiento de la señal basadas en computación cognitiva. Las técnicas de inteligencia artificial, tales como aprendizaje automático (*machine learning*) y neurocomputación aplicadas al análisis de señales psicofisiológicas, han demostrado su robustez para la clasificación de complejos constructos cognitivos. La realidad virtual (RV) es una herramienta que permite recrear situaciones de la vida real con una alta fidelidad sensorial, pero al mismo tiempo controlar individualmente cada una de las situaciones y estímulos que influyen en el comportamiento humano. También permite la medición en tiempo real de las reacciones humanas ante tales estímulos. Este documento analiza los últimos avances científicos y tecnológicos relevantes para sus aplicaciones en el diagnóstico del TEA. Afirmamos que la RV es una herramienta muy valiosa para la investigación del TEA, especialmente para la evaluación y diagnóstico de habilidades y competencias complejas.

Palabras clave: trastornos del espectro autista, realidad virtual, inteligencia artificial, aprendizaje automático

Abstract *Use of virtual reality for neurodevelopmental disorders: a review of the state of the art and future agenda.* To date, the diagnostic tools for autism spectrum disorder (ASD) have been mostly based on qualitative criteria from observational information in contexts with low ecological validity. We are witnessing a growing scientific activity that proposes the use of implicit measures for the evaluation and diagnosis of ASD. These measures are based on processes of a biological and unconscious nature, underlying the capacity of human cognition, and are obtained through the acquisition and treatment of brain, physiological and behavioral responses in order to obtain the behavioral structure of the ASD patient facing a stimulus. The complex relationship between physiological responses and the behavioral structure of the ASD patient requires the use of advanced techniques of signal processing based on cognitive computation. Artificial intelligence (AI) techniques, such as machine learning and neurocomputing applied to the analysis of psychophysiological signals, have demonstrated their robustness for the classification of complex cognitive constructs. Virtual reality (VR) is a tool that allows recreating real-life situations with high sensory fidelity, but at the same time individually controlling each of the situations and stimuli that influence human behavior. It also allows the measurement in real time of human reactions to such stimuli. This document analyzes the latest scientific and technological advances relevant to its applications in the diagnosis of ASD. We conclude that VR is a very valuable tool for ASD research, especially for the evaluation and diagnosis of complex skills and competencies.

Key words: autism spectrum disorder, virtual reality, artificial intelligence, machine learning

Diagnóstico del TEA

El Trastorno del Espectro Autista (TEA) es una afectación que atiende a criterios poli genéticos y multifactoriales.

Aunque actualmente ha quedado establecida como sintomatología nuclear, por las dificultades en cuanto a interacción social, comunicación, imaginación y conductas o comportamientos repetitivos, los pacientes diagnosticados con TEA pueden presentar otras dificultades en mayor o menor grado. Entre ellas, puede haber una presencia en cuanto a desregulación de carácter sensorial, déficits asociados a la motricidad o dificultades de carácter cog-

Dirección postal: Dr. Mariano L. Alcañiz, Instituto de Investigación e Innovación en Bioingeniería (i3), Universidad Politécnica de Valencia, España

e-mail: malcaniz@i3b.upv.es

nitivo. Dicha disparidad sintomatológica junto con el grado de dificultad presentado en uno u otro ámbito, es lo que la convierte en un trastorno de carácter complejo. Es, por tanto, una afectación heterogénea, cuyo diagnóstico firme es generalmente tardío, lo que dificulta la definición de las líneas de actuación terapéuticas.

La evaluación o diagnóstico del TEA se lleva a cabo en contextos controlados, donde las respuestas del paciente distan de las que obtendríamos en contextos reales. Además, se aplican baterías tradicionales, cuyos resultados se basan en parámetros cualitativos obtenidos a través de los criterios observacionales del terapeuta tales como escala de observación para el diagnóstico del autismo (ADOS).

Para una evaluación correcta del TEA, el terapeuta no puede ignorar las discapacidades sensoriales y la sobre selectividad frente a los estímulos¹. Por esa razón, esta deficiencia es otro elemento dentro de la prueba de lápiz y papel que puede definir el grado de afectación. El inconveniente de estas pruebas es que los niños pueden haber sido enseñados a responder de una manera particular². Si la misma situación ocurre en el mundo real, las terapias obtendrán una respuesta diferente. Por esta razón, la investigación debe examinar nuevos modelos de evaluación basados en medidas implícitas y objetivas dentro de entornos controlados, donde el terapeuta puede administrar el grado de estimulación.

Medidas implícitas en TEA

Las llamadas medidas implícitas son entendidas como procesos de carácter biológico e inconsciente, subyacentes a la capacidad de cognición humana, que un paciente muestra ante un estímulo externo. Hasta el momento, las teorías de cognición social asumían que los seres humanos podían verbalizar deliberadamente sus emociones, comportamientos y actitudes. Recientes avances en Neurociencia Cognitiva Social (NCS), demuestran que los procesos que regulan nuestra interacción con el contexto al que nos exponemos, se traducen en procesos implícitos automáticos, que quedan fuera del control consciente del sujeto³.

La introducción de métricas implícitas en la evaluación del TEA supone una evolución hacia un diagnóstico de carácter cuantitativo, capaz de superar los criterios evaluables en las baterías tradicionales. Su aplicación se ha llevado a cabo mediante el uso de sistemas de adquisición de imágenes cerebrales y respuestas fisiológicas, todas ellas con el objetivo de obtener la estructura comportamental del paciente TEA ante un estímulo, dejando al margen su respuesta verbal. Entre ellas cabe señalar la resonancia magnética funcional (fMRI), la cual ha hallado un dominio de la hiperreactividad cerebral, además de déficits en la ínsula media y posterior y la corteza cinglada

posterior en pacientes TEA⁴. La actividad bioeléctrica cerebral, registrada mediante encefalografía (EEG), se ha empleado para el estudio de la afectación, en concreto para profundizar en la plasticidad cerebral ante un contexto de carácter social. La medición de la asimetría cerebral mostró que una mayor actividad en el hemisferio izquierdo puede asociarse con una mayor presencia de sintomatología TEA⁵. Otra medida de carácter cuantitativo utilizada ha sido la variabilidad cardiaca (HR). La aplicación de la estimulación magnética transcranial (TMS) en la zona cerebral prefrontal y dorso lateral, logró un incremento de la variabilidad cardiaca y un descenso del ritmo cardiaco en pacientes TEA, derivando en una menor presencia de comportamientos repetitivos y patrones conductuales agresivos⁶.

Otras mediciones de carácter psicofisiológico que han tenido una amplia aplicabilidad en el ámbito investigador del TEA, han sido los patrones electrodérmicos, proporcionados mediante la Actividad Electrodermal (EDA). Como medida evaluadora, existen en la literatura acciones científicas que han logrado relacionar dicha medida con los niveles de procesamiento sensorial o con el grado de afectación del trastorno⁷.

Las mediciones del comportamiento ocular mediante los llamados dispositivos de *Eye tracking*, han tenido una vasta aplicabilidad en el campo del TEA, relacionando los patrones de mirada con la presencia de déficits nucleares. Diversos trabajos han logrado relacionar dicha medida implícita con los déficits centrales de la afectación, con el grado de desarrollo de competencias sociales, emocionales o de carácter cognitivo⁸. Incluso, se han hallado predictores del TEA basándose en el comportamiento ocular y el procesamiento facial en situaciones que cuentan con implicación social.

El reconocimiento de acciones corporales estereotipadas en sujetos TEA como medida cuantitativa, ha supuesto hasta la fecha una dificultad para la comunidad científica. El uso de cámaras RGB (*Red, Green and Blue*) y acelerómetros posicionados en el cuerpo del paciente⁹, nos han reportado resultados poco robustos y fiables. La problemática radica en el desarrollo de clasificadores que sean robustos ante la amplia variedad de patrones existentes.

Cabe señalar que la gran mayoría de los trabajos citados solo han probado una técnica de medición única, y no el uso sincronizado de varias medidas sobre el mismo tema, lo que sin duda aumentaría la confiabilidad de las métricas obtenidas, como ha sido recientemente propuesto¹⁰.

Hasta ahora, las metodologías de medidas implícitas se pueden dividir en dos grupos: observar el comportamiento del participante en un escenario real o diseñar experimentos en entornos de laboratorio. El principal problema con los escenarios reales es que no es fácil estudiar las respuestas humanas en situaciones reales, debido a la incapacidad

del experimentador para controlar totalmente los estímulos involucrados en la experiencia. A la inversa, en entornos de laboratorio, los sujetos se enfrentan a estímulos controlados que no incluyen otras variables que están presentes en situaciones de la vida real, lo que lleva a una baja validez ecológica del experimento.

La realidad virtual (RV) surge como una tecnología prometedora que puede superar los problemas mencionados anteriormente. La RV ofrece la posibilidad de generar diversas situaciones reales, incluidas situaciones sociales que generan experiencias corporales en las que el cuerpo, el entorno y el cerebro están estrechamente relacionados.

Realidad virtual en el TEA

Desde la década de los 90 una tímida producción científica con muestras experimentales pequeñas, empezó a realizar las primeras enumeraciones de los beneficios que los entornos virtuales o RV podía tener en la intervención en pacientes con TEA. Entre ellos destacan la capacidad de controlar-estimular en un contexto ecológico, similar al mundo circundante, la capacidad de estimular diversos canales sensoriales al unísono dentro de entornos seguros, los beneficios de crear situaciones con posibilidad de interacción hombre máquina e incluso se apuntaba ya hacia la posibilidad de incorporar dispositivos para la obtención de métricas implícitas¹¹.

En 1997 Strickland y col. desarrollaron entornos virtuales que incluían el entrenamiento en habilidades diarias. Su objetivo fue que los 5 participantes aceptaran el uso de la tecnología y que transfirieran el conocimiento adquirido a la vida real¹¹. El equipo de Parsons llevó a cabo el proyecto de investigación *AS Interactive Project*, destinado al aprendizaje de habilidades sociales en adultos diagnosticados con síndrome de Asperger. Para ello plantearon el aprendizaje asistido por ordenador mediante el uso de aplicaciones gráficas interactivas de baja inmersión, basadas en interfaces visuales de pantallas de ordenador, concluyendo que no hubo dificultades en cuanto a la navegación o interacción tecnológica, ni en la identificación de los elementos virtuales, además de considerar un beneficio la predictibilidad y estabilidad que ofrece el contexto virtual¹². En 2005 se diseñaron entornos colaborativos para estudiar la potencialidad de los mismos en intervenciones sobre reconocimiento emocional a través del uso de avatares en pacientes diagnosticados con TEA. La validación del sistema se realizó mediante cuestionarios completados por los pacientes y sus familias y por los datos registrados por el sistema, concluyendo que el 90% de los participantes entendieron las emociones mostradas de forma adecuada¹³. Los hallazgos que apuntaban a la mejoría en la ejecución de tareas cuando mediaba la presencia de un agente de apoyo para los pacientes, llevaron a Josman y col. en 2008 a retomar el

aprendizaje virtual de situaciones peligrosas cotidianas representando al paciente mediante un avatar. Los pacientes TEA mostraron capacidad de aprendizaje, siendo ésta significativa tras el entrenamiento en el entorno¹⁴. Ese mismo año se estudió la capacidad de pacientes TEA de elegir el rostro conveniente ante determinadas afirmaciones. Tras un entrenamiento de 13 sesiones, el grupo experimental mostró un peor desempeño que los pacientes normotípicos. Bajo el mismo paradigma de uso de entornos virtuales en versión de escritorio, se han realizado trabajos de investigación con el fin de proporcionar una mejoría en el entrenamiento de la capacidad de interacción social recíproca y de la empatía. Para ello, se han empleado contextos de aprendizaje virtual en los que se dan situaciones que implican socialización, habiendo efectos positivos de mejoría tras varias sesiones de intervención. Para la mejora de la capacidad empática de los participantes, además de aplicar entornos virtuales con escenarios sociales a los que acompañaban preguntas sobre las mismas, introdujeron la figura de un avatar para lograr involucrar a los participantes con el entorno. Tras varios meses de intervención, los participantes lograron mejoras significativas en cuanto al desarrollo de la empatía en situaciones virtuales de carácter social. En la misma línea de lograr una mejora de la cognición social mediante intervenciones virtuales, Kandalaf y col. diseñaron un entorno basado en la tecnología *Second Life*, entendida como contextos estéticamente reales que permiten la interacción multijugador. El participante se personificó en un avatar personalizable capaz de navegar por distintos contextos (edificio de oficinas, un salón de billar, un restaurante, una tienda de tecnología, un apartamento, una cafetería, una escuela, un campo y un parque), mientras que se expusieron a una situación social en la que se hallaba un personaje con el que interaccionar. Tras varias sesiones, mostraron una mejora significativa en comunicación verbal y no verbal, en la capacidad de lectura de la mente de los agentes virtuales y en habilidades conversacionales¹⁵.

Todos los estudios científicos citados hasta el momento, presentan cuatro características comunes: se encuentran centrados en el entrenamiento, aplican tecnología RV de baja inmersión, centrada en interfaces visuales de escritorio y realizan mediciones de carácter cualitativo. Ello conlleva una baja inmersión del paciente en el mundo virtual, dejando de lado el estado psicológico mediante el cual se encuentra envuelto por el entorno e interactuando con el mismo a través de todos los canales sensoriales¹⁶. Se ha demostrado que la aplicación de entornos virtuales inmersivos, produce una activación de las áreas cerebrales involucradas ante un estímulo, similar a la que se produciría en un contexto real¹⁷.

A partir de ese momento, los estudios comienzan a aplicar tecnología virtual que supera los entornos de escritorio descritos. Para ello y adaptándose a las caracte-

terísticas de los pacientes TEA con respecto al rechazo de usar cascos de RV, los estudios comienzan a aplicar los denominados Entornos Virtuales Inmersivos (EVI). Su origen se halla en los simuladores que integraron en espacios físicos pantallas de gran tamaño, capaces de responder al usuario en tiempo real y lograr una interacción entre el participante y la tecnología de carácter natural. En el contexto del TEA, la investigación siguió focalizada hacia el entrenamiento y hacia la evaluación cualitativa del efecto del mismo sobre los pacientes TEA. Prueba de ellos son los trabajos llevados a cabo para mejorar la comunicación no verbal¹⁸, los niveles atencionales y la reducción de los niveles de estrés en pacientes TEA.

En cuanto a las métricas empleadas, asistimos a una pérdida de la respuesta inconsciente e implícita del paciente, estando sujeta la investigación todavía a criterios observacionales y por tanto de carácter subjetivo. Ello supone una brecha científica a abordar en el futuro.

De nuevo nos hallamos ante una producción científica que, aunque ha logrado introducir la inmersión en los contextos virtuales mediante entornos no invasivos y adaptables a la afección que nos ocupa, siguen dejando de lado la evaluación de la afectación y la orquestación de diversas señales de carácter implícito reportadas por el propio paciente, existiendo una carencia de estudios que contengan una evaluación neuropsicológica exhaustiva y un análisis de los datos reportados que vaya más allá de métodos estadísticos clásicos capaces de extrapolar en forma de biomarcadores la afección.

Machine learning: análisis de datos

La compleja relación existente entre respuestas fisiológicas y la estructura comportamental del paciente TEA ante un estímulo, obliga a utilizar técnicas avanzadas de tratamiento de la señal basadas en computación cognitiva. Las técnicas de inteligencia artificial (IA), tales como *machine learning* y neurocomputación aplicadas al análisis de señales psicofisiológicas, han demostrado su robustez para la clasificación de complejos constructos cognitivos¹⁹. Por otra parte, el hallar marcadores cuantificables de dicha compleja relación, conlleva el realizar el análisis simultáneo y orquestado de varias variables psicofisiológicas a la vez.

En conclusión, de estos estudios iniciales, podemos concluir que la RV puede provocar reacciones humanas complejas en niños con TEA a estímulos virtuales, y puede mejorar la comprensión de los procesos cerebrales implícitos relacionados con el TEA. La literatura anterior indica que se han realizado avances significativos en el estudio del uso de la RV para obtener información sobre los comportamientos relacionados con el TEA. Esto ha sido en gran parte poco conocido, tal vez porque la calidad metodológica ha sido limitada y el potencial para una

mayor difusión hasta ahora, también limitada. Los estudios han sido típicamente pequeños, los resultados negativos tienen menos probabilidades de haberse informado y, en la mayoría la literatura ha sido claramente fragmentada. El progreso ha sido comprensiblemente lento porque el *hardware* y el *software* han sido caros y la experiencia limitada. Por ello, la gran mayoría de los trabajos se han basado en el uso de técnicas gráficas multimedia de baja inmersión. Esta situación está cambiando gracias a la disponibilidad actual de dispositivos de RV de bajo coste. Por otra parte, la mayoría de trabajos presentados hasta la fecha, no han utilizado correlatos de medidas implícitas, y si lo han hecho, ha sido usando estímulos reales o mediante técnicas multimedia poco inmersivas. Por otra parte, la orquestación de varias señales implícitas junto con la aplicación de técnicas avanzadas de tratamiento de la señal basadas en inteligencia artificial, está emergiendo como una línea de investigación sumamente prometedora para el desarrollo de métodos robustos de diagnóstico del TEA. En esta línea se está desarrollando el proyecto T-ROOM por el equipo del profesor Alcañiz junto con el equipo clínico del centro *Red Ceni*²⁰. El proyecto T-ROOM utiliza como sistema de RV de alta inmersión, una sala tipo CAVE de bajo coste, basada en proyectores convencionales para la estimulación visual de paciente con TEA. En la sala de 3x3 metros, los pacientes interactúan de forma libre con los estímulos presentados. La estimulación auditiva se lleva a cabo mediante un sistema de audio espacial 3D y la olfativa mediante una máquina de olores artificiales. En dicho proyecto, se están desarrollando biomarcadores basados en medidas implícitas utilizando las siguientes señales: el seguimiento ocular, la actividad electrodermal y el movimiento corporal. Se están aplicando técnicas de procesamiento de la señal basadas en *machine learning* para poder clasificar la compleja interacción existente entre las señales fisiológicas y comportamentales y los constructos cognitivos y emocionales relacionados con la afectación del TEA.

Agradecimientos: Este trabajo fue apoyado y financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España, bajo el título: "Herramientas avanzadas terapéuticas para la salud mental" (DPI2016-77396-R) y "Entorno virtual inmersivo para la evaluación y capacitación de niños con trastorno del espectro autista: T Room" (IDI-20170912).

Conflicto de intereses: Ninguno para declarar

Bibliografía

1. Lovaas OI, Koegel RL, Schreibman L. Stimulus overselectivity in autism: A review of research. *Psychol Bull* 1979; 86: 1236-54.
2. Francis K. Autism interventions : A critical update. *Dev Med Child Neurol* 2005; 47: 493-9.
3. Lieberman MD. Social cognitive neuroscience. En: Fiske

- ST, Gilbert DT, Lindzey G (Eds.), *Handbook of social psychology*. Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons Inc, 2010, p 143-93.
4. Di Martino A, Yan CG, Li Q, et al. The autism brain imaging data exchange: towards a large-scale evaluation of the intrinsic brain architecture in autism. *Mol Psychiatry* 2014;19: 659-67.
 5. Van Hecke AV, Stevens S, Carson AM, et al. Measuring the plasticity of social approach: A randomized controlled trial of the effects of the PEERS intervention on EEG asymmetry in adolescents with Autism Spectrum Disorders. *J Autism Dev Disord* 2013; 45: 316-35.
 6. Wang Y, Hensley MK, Tasman A, Sears L, Casanova MF, Sokhadze EM. Heart Rate Variability and Skin Conductance During Repetitive TMS Course in Children with Autism. *App Psychophysiol Biofeedback* 2016; 41: 47-60.
 7. Fenning RM, Baker JK, Baucom BR, Erath SA, Howland MA, Moffitt J. Electrodermal Variability and Symptom Severity in Children with Autism Spectrum Disorder. *J Autism Dev Disord* 2017; 47: 1062-72.
 8. Chita-Tegmark M. Attention Allocation in ASD: a review and meta-analysis of eye-tracking studies. *Rev J Autism Dev Disord* 2016; 3: 209-23.
 9. GroBekathöfer U, Manyakov NV, Mihajlović V, et al. Automated Detection of Stereotypical Motor Movements in Autism Spectrum Disorder Using Recurrence Quantification Analysis. *Front Neuroinform* 2017;11: 9.
 10. Giglioli G, Pravettoni DL, Martín S, Parra E, Raya MA. A novel integrating virtual reality approach for the assessment of the attachment behavioral system. *Front Psychol* 2017; 8: 1-7.
 11. Strickland D. Virtual reality for the treatment of autism. *Stud Health Technol Inform* 1997; 44: 81-86.
 12. Parsons S, Mitchell P, Leonard A. The use and understanding of virtual environments by adolescents with autistic spectrum disorders. *Journal Autism Dev Disord* 2004; 34: 449-66.
 13. Moore D, Cheng Y, Mcgrath P, Powell NJ. Collaborative virtual environment technology for people with autism. *FOADD* 2016; 20: 231-43.
 14. Josman N, Hadass Milika BCh, Shula FPLW. Effectiveness of virtual reality for teaching street-crossing skills to children and adolescents with autism. *Int J Disabil Hum Dev*. 2011; 7: 49-56.
 15. Kandalaf MR, Didehban N, Krawczyk DC, Allen TT, Chapman SB. Virtual reality social cognition training for young adults with high-functioning autism. *J Autism Dev Disord* 2013; 43: 34-44.
 16. Blascovich JJ, Loomis J, Beall AC, Swinth KR, Hoyt CL, Bailenson JN. Immersive virtual environment technology as a methodological tool for social psychology. *Psychol Inq* 2002; 13: 103-24.
 17. Alcañiz M, Rey B, Tembl J, Parkhutik V. A neuroscience approach to virtual reality experience using transcranial doppler monitoring. *Ann Rev Cyberther Telem* 2009; 18: 97-111.
 18. Cai Y, Chia NK, Thalmann D, Kee NK, Zheng J, Thalmann NM. Design and development of a virtual dolphinarium for children with autism. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 2013; 21: 208-17.
 19. Marín-Morales J, Higuera-Trujillo J L, Greco A, et al. Affective computing in virtual reality: emotion recognition from brain and heartbeat dynamics using wearable sensors. *Scientific reports* 2018; 8 (1): 13657.
 20. Olmos-Raya E, Martínez A, Sousa N, Raya M. Implicit responses for assessment of autism based on natural behaviors obtained inside immersive virtual environment. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, Int J Med Health Biomed Bioeng Pharml Eng* 2018; 12: 502-9.