



Nuevas tecnologías e inteligencia artificial en neurorrehabilitación

New technologies and artificial intelligence in neurorehabilitation

Alan Juárez Belaúnde^{1*} y Manuel Murie-Fernández^{2,3}

¹Área de Neurorrehabilitación y Atención al Daño Cerebral, Fundación Instituto San José, Madrid;

²Departamento de Neurología, Clínica San Miguel, Pamplona;

³Unidad de Neurorrehabilitación, Hospital Ciudad de Telde, Gran Canaria, España

Resumen

La prevalencia del daño cerebral sobrevenido presenta un alza en todo el mundo que implica una evolución en su manejo por parte de nuestro sistema sanitario. El reconocimiento de la regeneración neuronal y la mejora de la funcionalidad tras un daño cerebral han supuesto un cambio de paradigma en la atención a estos pacientes, consolidándose un proceso neurorrehabilitador centrado en el paciente, guiado por un equipo interdisciplinario y llevado a cabo en unidades especializadas. El avance de la aplicación de las nuevas tecnologías en la medicina no ha sido ajeno al área de la neurorrehabilitación y presenta una constante evolución en campos como la robótica, la estimulación neurosensorial y las intervenciones neuromoduladoras, entre otras, que permiten una aplicación terapéutica en el proceso rehabilitador inicial, así como asistencial en el período de reinserción y adaptación posterior al medio. La inteligencia artificial es una herramienta útil y esperanzadora para afrontar las limitaciones iniciales que presentaban estos recursos. Esta herramienta requerirá un aprendizaje constante por parte del profesional sanitario, así como la incorporación de bioingenieros al equipo de trabajo de una unidad de neurorrehabilitación.

Palabras clave: Neurorrehabilitación. Inteligencia artificial. Nuevas tecnologías. Robótica. Realidad virtual.

Abstract

The prevalence of brain damage is increasing worldwide, which implies an evolution in its management by our health system. The recognition of neuronal regeneration and the improvement of functionality after brain damage has led to a paradigm shift in the care of these patients, consolidating a neurorehabilitation process centered on the patient, guided by an interdisciplinary team, and carried out in specialized units. The advance in the application of new technologies in medicine has not been alien to the area of neurorehabilitation and presents a constant evolution in fields such as robotics, neurosensory stimulation and neuromodulatory interventions, among others, which allow a therapeutic application in the initial rehabilitation process, as well as assistance in the period of reinsertion and subsequent adaptation to the environment. Artificial Intelligence is shown as a useful and hopeful tool to face the initial limitations that these resources present. This tool will require constant learning by the healthcare professional, as well as the incorporation of bioengineers into the work team of a neurorehabilitation unit.

Keywords: Neurorehabilitation. Artificial intelligence. New technologies. Robotics. Virtual reality.

***Autor de correspondencia:**
Alan Juárez Belaúnde
E-mail: alanluis.juarez@sjd.es

Fecha de recepción: 04-04-2023
Fecha de aceptación: 11-04-2023
DOI: 10.24875/KRANION.M23000056

Disponible en internet: 13-06-2023
Kranion. 2023;18:65-71
www.kranion.es

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las enfermedades neurológicas siguen presentando en todo el mundo un incremento tanto en prevalencia como en incidencia, y suponen la primera causa de discapacidad ajustada por años de vida y la segunda de mortalidad¹. Según la Federación Española de Daño Cerebral, de acuerdo con la *Encuesta de discapacidad, autonomía personal y situaciones de dependencia* del Instituto Nacional de Estadística de abril de 2022, en nuestro país hay más de 435.400 personas con daño cerebral sobrevenido (DCS), lo que supone un incremento del 3,65% con respecto a la encuesta anterior, de 2008. La causa principal de DCS sigue siendo el ictus, con un 84%, seguido del traumatismo craneoencefálico, secuelas posquirúrgicas, encefalopatía hipóxico-isquémica y otras encefalitis o encefalopatías, con un 16%².

Muchas de estas enfermedades conllevan numerosas secuelas, tanto funcionales como cognitivas, que pueden suponer una gran limitación para volver al estilo de vida previo y con un coste sociosanitario asociado importante. Una adecuada intervención neurorrehabilitadora temprana puede posibilitar que la recuperación sea importante y, a la postre, que el paciente consiga, pese a las secuelas definitivas, una ganancia de capacidad de adaptación a las actividades básicas e instrumentales de la vida previa al DCS.

¿QUÉ ES LA NEURORREHABILITACIÓN?

La Organización Mundial de la Salud define la neurorrehabilitación como un proceso activo mediante el que los individuos con alguna lesión o enfermedad neurológica pueden alcanzar la mejor recuperación integral posible que les permita su desarrollo físico, mental y social de la mejor forma, para integrarse a su ámbito vital de la manera más apropiada³.

Las intervenciones de neurorrehabilitación se han disparado desde el año 2000 gracias a un cambio en el paradigma de su atención neurológica desde mediados del siglo XX, dejando de suponer que el efecto de una lesión cerebral sobre la función, la actividad y la participación es permanente, para centrarse en el potencial regenerativo del cerebro y su reorganización dinámica meses e incluso años después del DCS. Este cambio de mentalidad conllevó un impulso de la investigación translacional para definir las condiciones en las que se potencia la recuperación cerebral, derivando en la necesidad de una estimulación controlada e intensiva de las redes cerebrales dañadas mediante distintas herramientas de neuromodulación y reparación neuronal^{4,5}.

La neurorrehabilitación requiere un proceso asistencial complejo en el que el especialista debe identificar las alteraciones y guiar los fenómenos de la plasticidad intrínseca del sistema nervioso para minimizar sus repercusiones y maximizar la recuperación, prevenir las complicaciones sistémicas y neurológicas propias de la evolución

tras el daño del sistema nervioso y conseguir la mayor autonomía funcional posible física, cognitiva y conductual. También deben potenciarse las capacidades preservadas, de manera que se posibilite la mejor reinserción social de la persona a su entorno habitual⁶.

En las últimas décadas se ha experimentado un claro avance sociosanitario en la atención neurorrehabilitadora al DCS, tanto en España como en otros países. Sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer para conseguir un modelo de atención continuada (fases aguda, subaguda y crónica). Los resultados del *Atlas del ictus en España*, publicado en 2019 por el Grupo de Estudio de Enfermedades Cerebrovasculares de la Sociedad Española de Neurología, destacan que el 37,3% de los pacientes supervivientes de un ictus perciben su estado de salud como regular y el 36,5% como malo o muy malo, el 62,4% refieren tener problemas de movilidad básicos y el 59,1% dificultades para realizar sus actividades cotidianas⁷.

MODELO DE TRABAJO EN UN CENTRO NEURORREHABILITADOR

El proceso de la neurorrehabilitación requiere el trabajo de un equipo interdisciplinario muy especializado, convenientemente entrenado y formado por diferentes profesionales (Tabla 1), que permita un manejo integral de la persona afectada con la adecuada combinación de las técnicas convencionales y la introducción de las nuevas tecnologías (NNTT)⁸. En este modelo de atención, el neurólogo cumple un papel fundamental, pues su especial formación en neuroanatomía y su conocimiento sobre la fisiopatología neurológica y la neurofarmacología resultan cruciales para abordar las complicaciones propias de estos pacientes, manejando de la mejor manera posible los efectos beneficiosos de las intervenciones farmacológicas y no farmacológicas disponibles, y garantizando así no solo el proceso neurorrehabilitador más adecuado en cada caso, sino también el conocimiento y la pericia necesarios para la toma de decisiones en aspectos complejos de los ámbitos clínico, investigador, ético y legal, muy habituales en este contexto.

El desarrollo del conocimiento científico en el campo de la neurorrehabilitación ha conllevado la participación directa y constante de profesionales de otras ramas del conocimiento, como informáticos, físicos y bioingenieros, que se han incluido en el equipo interdisciplinario para el adecuado proceso aplicativo de NNTT como la robótica, las interfaces cerebro-máquina y las técnicas de estimulación cerebral y medular no invasivas e invasivas⁹.

Según la Sociedad Española de Neurorrehabilitación, estos procesos deben llevarse a cabo dentro de unidades clínico-asistenciales especializadas, reconocidas como unidades de neurorrehabilitación¹⁰. Estas unidades, debidamente adheridas a un sistema de atención sanitaria continuada, abarcan desde la atención en etapas subagudas del DCS (rehabilitación neurológica en un medio

TABLA 1. Equipo interdisciplinario en una unidad de neurorrehabilitación

Médicos	Terapeutas	Otros profesionales
Neurologos	Fisioterapeutas	Nutricionistas
Médicos rehabilitadores	Terapeutas ocupacionales	Enfermeros
Médicos internistas	Logopedas	Técnicos auxiliares
Psiquiatras	Neuropsicólogos	Farmacéuticos
Neurofisiólogos	Psicólogos clínicos	Trabajadores sociales
Neurocirujanos	Musicoterapeutas	Educadores
Digestólogos		Bioingenieros
Urólogos		Informáticos
Traumatólogos		
Cirujanos generales		
Otros especialistas		

hospitalario que permita, dependiendo de la complejidad del caso, atender la posible comorbilidad emergente mientras se producen los procesos de neuromodulación y reparación neuronal) hasta el posterior manejo ambulatorio con rehabilitación de mantenimiento y la adecuada reinserción social, familiar y laboral de la persona¹¹.

LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA NEURORREHABILITACIÓN

El uso de las NNTT en neurorrehabilitación está teniendo una rápida expansión, tanto en investigación como en sus aplicaciones clínicas. En los años 1990, a partir de investigaciones en modelos animales con lesión medular de recuperación funcional con cintas de marcha y sistemas de soporte corporal, empezaron a diseñarse las primeras aplicaciones rudimentarias de cintas de marcha con soporte de peso para entrenamiento locomotor en sujetos que habían sufrido un ictus o daño medular. Surgió así un creciente interés por analizar la fisiología de la marcha y generar los primeros modelos robóticos con control de posicionamiento mientras se lleva a cabo un entrenamiento locomotor. Este es el inicio de la robótica y de la aplicación progresiva de las NNTT en neurorrehabilitación¹².

Expansión de un nuevo modelo de trabajo tras la pandemia de COVID-19

Sin embargo, a pesar de la rápida expansión y el reconocimiento de la aportación de las NNTT en esta área de la medicina, muchos profesionales aún la veían como una herramienta que debía ser valorada a largo plazo en la práctica diaria en el paciente con DCS. A partir de la pandemia de COVID-19 en el año 2020 surgió la necesidad de adaptarse a las dificultades de interac-

ción social y mantener una terapia lo más completa posible, esbozando la incorporación de la tecnología en los centros de neurorrehabilitación según las recomendaciones entonces publicadas¹³.

España, uno de los países más castigados por la pandemia en Europa, no fue una excepción, y la neurorrehabilitación se vio gravemente afectada. Muchos centros de atención neurorrehabilitadora de nuestro país, públicos y privados, tuvieron una disminución en el número de ingresos tanto hospitalarios como ambulatorios, y quienes ingresaban lo hacían con mayor tiempo transcurrido entre el DCS y el inicio de la rehabilitación, mayor gravedad de las lesiones y mayor grado de secuelas. Además, los protocolos de actuación para su correcta atención, respetando las medidas de bioseguridad implantadas, requirieron adaptar las instalaciones y los recursos, utilizar maquinaria robótica en la rehabilitación motórica para evitar la interacción terapeuta-paciente, llevar a cabo un mayor apoyo psicológico y procurar altas médicas más tempranas, fomentando la rehabilitación de mantenimiento ambulatoria de los pacientes en su propio domicilio mediante telerrehabilitación^{14,15}. Todas estas aplicaciones de nuevos recursos en la rehabilitación neurológica fueron muy bien aceptadas por los profesionales y por los pacientes¹⁶.

Telerrehabilitación

Esta herramienta de telemedicina permite la rehabilitación a distancia del paciente, tanto motora, con la interacción del terapeuta con el paciente mediante plataformas dotadas de videocámara, como cognitiva, con el uso de programas específicos, interacción con videojuegos y otros recursos, como la realidad virtual. Esta modalidad terapéutica no solo permite el trabajo en directo (síncrono), sino también en diferido (asíncrono) con tareas

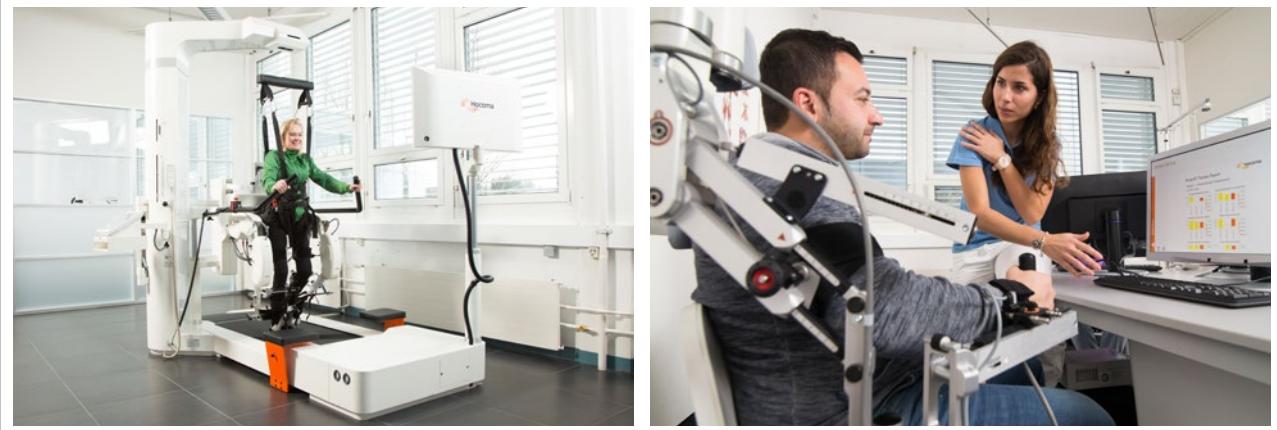


FIGURA 1. Ejemplos de robots aplicados a la neurorrehabilitación. Izquierda: Lokomat®, robot para uso terapéutico rehabilitador del miembro inferior. Derecha: Armeo®Spring, robot para uso terapéutico rehabilitador del miembro superior. *Con permiso de Hocoma AG®.*

habituales del paciente en su rutina diaria, pudiendo llevarse a cabo un seguimiento evolutivo a distancia gracias al análisis que los mismos programas hacen de los resultados del paciente.

Los estudios de investigación sobre estas estrategias terapéuticas arrojan resultados positivos, pero al mismo tiempo advierten que se requiere mayor evidencia, mejora de los costes y la accesibilidad, reducción de las barreras tecnológicas, entrenamiento de terapeutas y cuidadores para el adecuado uso de la tecnología por la persona afectada, así como una potenciación de su uso desde asociaciones de pacientes, administraciones sanitarias, compañías informáticas y sociedades científicas¹⁷.

Robótica

En los últimos años, la robótica está teniendo una importante expansión en neurorrehabilitación. En general, este tipo de dispositivos se pueden dividir en tres grupos: robótica de servicio, *non-wearables* (no portátiles) de asistencia y *wearables* (portátiles) de asistencia.

Los dispositivos de servicio no tienen un uso terapéutico directo. Sirven de asistencia para personas con discapacidad definitiva en actividades de la vida diaria como comer, beber, vestirse, etc. Pueden estar preprogramados o ser autónomos. Utilizan una interfaz de reconocimiento de movimientos faciales, oculares, etc., o tecnología más avanzada, como interfaces cerebro-máquina con sensores de electroencefalografía integrados.

Los dispositivos de asistencia *non-wearables* son aquellos cuyo uso no implica la utilización de artefactos sobre la propia persona a manera de vestimenta. Tienen un uso terapéutico rehabilitador y han demostrado beneficio en estudios realizados dentro de una rutina neurorehabilitadora en los primeros meses tras el DCS. Los robots con soporte de peso y apoyo en la marcha, como Lokomat® (Fig. 1), son un buen ejemplo.

Los dispositivos de asistencia *wearables* son aquellos que tienen que ser debidamente equipados en la persona y proporcionan un beneficio terapéutico y de ganancia de autonomía. Los exoesqueletos son el ejemplo más característico de este grupo. Tienen mayor aplicabilidad en el trabajo de funcionalidad del miembro superior (p. ej., Armeo®Spring). Al igual que los robots de servicio, pueden estar preprogramados o ser autónomos mediante el uso de interfaces¹⁸.

La evolución tecnológica de estas herramientas ya permite, al mismo tiempo que se aplica la terapia, analizar parámetros relacionados con la fuerza, la resistencia y la velocidad aplicadas por el paciente. Esta información, debidamente procesada, facilita un registro de datos al terapeuta para elaborar un plan evolutivo de la terapia aplicada, y además proporciona al propio paciente una retroalimentación (*biofeedback*) cuantitativa que favorece su adhesión a la terapia. Estos dispositivos permiten aumentar el número de pacientes tratados por cada terapeuta, mejorando la gestión de los recursos⁸.

Realidad virtual

Se trata de una tecnología en constante evolución. Permite la interacción con una réplica virtual realista para la adecuada interacción en un ambiente aplicado a la práctica de una función determinada. Cada vez existe más evidencia científica sobre sus beneficios clínicos y su capacidad de promover factores de neuroplasticidad tras el DCS, con la posibilidad de generar una retroalimentación visual, auditiva o táctil del aprendizaje motor y cognitivo por parte del paciente. Los programas diseñados para este recurso cada vez presentan mayor resolución y realismo, permitiendo enriquecer el medio virtual y favorecer el diseño del juego aplicado, algo que motivacionalmente es positivo y promueve la adecuada adhesión del paciente a los objetivos que busca el terapeuta¹⁸.

La realidad virtual es muy útil para favorecer la terapia dual, ya que permite trabajar al mismo tiempo con otras herramientas tecnológicas (soluciones híbridas), como por ejemplo la robótica o la neuromodulación transcraneal, aportando un mayor beneficio rehabilitador tanto cognitivo como motor¹⁹.

Técnicas de neuromodulación no invasiva

Las técnicas de neuromodulación no invasiva se asocian a las terapias tradicionales de rehabilitación desde etapas tempranas tras el DCS. Existen dos modalidades que van ganando evidencia de uso en este campo y que han demostrado que facilitan la regeneración neuronal a partir de los mecanismos naturales de neuroplasticidad: la estimulación magnética transcraneal repetitiva y la estimulación transcraneal por corriente directa.

Estimulación magnética transcraneal repetitiva

Genera una neuromodulación inducida por un campo magnético mediante impulsos a determinada frecuencia. La más usada habitualmente es la *theta burst* con tandas de 30 a 50 Hz a frecuencia *theta*, con dos modos de aplicación: continuo (tres estímulos cada 200 ms), para generar una inhibición en el área cortical deseada, o intermitente (2 s cada 10 s durante 190 s), para generar una estimulación¹⁸.

Estimulación transcraneal por corriente directa

Genera una neuromodulación inducida por electricidad directamente aplicada sobre el cráneo de manera continua con una intensidad de 1 a 2 mA durante 10 a 20 s. Dependiendo de la localización de los electrodos sobre el cuero cabelludo, la zona donde se coloque el ánodo genera un aumento de la excitabilidad cortical local y, en el caso del cátodo, una inhibición cortical local¹⁸.

APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN NEURORREHABILITACIÓN

Todos estos avances en neurorrehabilitación asistida por NNTT permiten obtener una gran cantidad de datos biométricos de la función motora y cognitiva del paciente mientras se realiza la terapia y de modo evolutivo. El análisis de estos datos con herramientas de inteligencia artificial (IA) puede facilitar la automatización en el manejo terapéutico del paciente (neurorrehabilitación de precisión), algo hasta hoy reservado a las decisiones del equipo interdisciplinario responsable del paciente. También puede mejorar la eficacia de la retroalimentación y el uso de interfaces del paciente con la máquina, sea para obtener un beneficio terapéutico progresivo, sea como asistencia en aquellas discapacidades definitivas^{19,20}.

La implementación de unidades de neurorrehabilitación con intervenciones repetitivas de larga duración, según los principios de rehabilitación por aprendizaje y neuroplasticidad²¹, así como el cuidado a largo plazo de la persona con DCS, implican un alto coste sanitario. Las NNTT aplicadas a la neurorrehabilitación permiten no solo evitar errores y riesgos laborales al terapeuta, sino también mejorar la eficiencia del centro, permitiendo que un mismo terapeuta pueda supervisar y dirigir la terapia de más pacientes en el mismo tiempo²². La aplicación de la IA puede facilitar mucho más este proceso.

De forma muy resumida, los algoritmos de IA siguen tres pasos: clasificación de los datos, predicción de resultados ficticios por modelos de regresión a partir de dichos datos y agrupación de estos para procesar una respuesta definitiva²³. Además de los datos clínicos clásicos, la IA puede procesar datos masivos como, entre otros, los derivados de las pruebas complementarias, los generados por las tecnologías de neurorrehabilitación o asistencia, así como los cambios evolutivos en las variables biométricas de los pacientes²⁴.

En el plano diagnóstico, su aplicación en estudios de neuroimagen y pruebas neurofisiológicas facilitaría establecer un pronóstico funcional y temporal en escenarios complejos, como por ejemplo los estados alterados de conciencia²⁵. Además, puede ayudar a definir subtipos y perfiles clínicos concretos que optimicen las indicaciones farmacológicas y neurorrehabilitadoras de cada paciente y su efectividad²⁶.

En el plano terapéutico, un sistema de IA conectado al dispositivo tecnológico (p. ej., un robot) podría «aprender» de los datos que se van recopilando del paciente mientras se lleva a cabo la terapia, de modo que la propia máquina sería capaz de tomar decisiones y hacer modificaciones progresivas en la terapia para el beneficio funcional o cognitivo del paciente. También posibilitaría la interconexión de los distintos recursos tecnológicos diagnósticos y terapéuticos para establecer un plan terapéutico individualizado y monitorizarlo (medicina de precisión) (Fig. 2).

Área de aplicación motora funcional

Las NNTT de rehabilitación motora tipo robots *wearables* y *non-wearables* pueden beneficiarse de la aplicación de IA para generar un plan terapéutico progresivo, individualizado y eficaz con mínima supervisión por parte del médico rehabilitador y el terapeuta. Además, gracias a sensores específicos se podría garantizar la seguridad del paciente durante la terapia en caso de incidencias que requirieran su detenimiento urgente, e incluso identificar patrones específicos durante la terapia que anticipen y eviten accidentes.

En relación con los dispositivos de asistencia a la dependencia mediados por las interfaces antes comentadas, la IA ya está desempeñando un claro papel que,

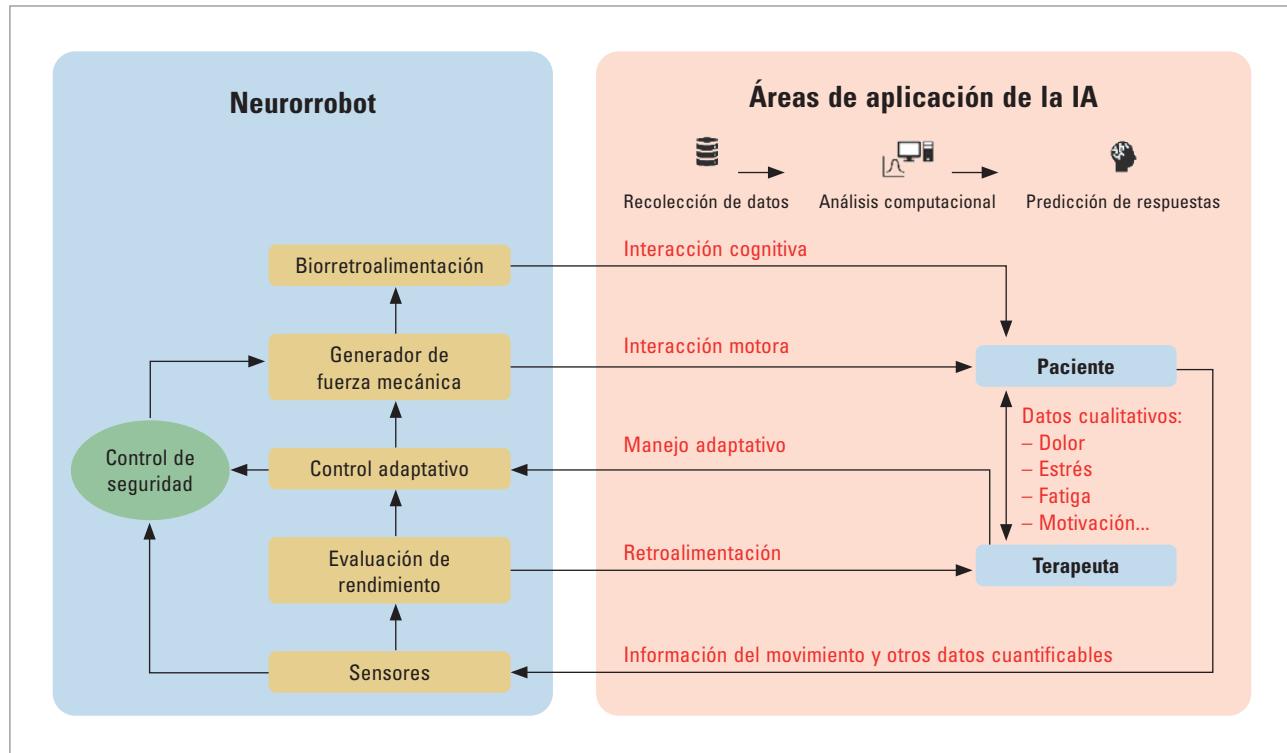


FIGURA 2. Aplicación de la inteligencia artificial en la interacción de paciente, terapeuta y neurorrobot. La inteligencia artificial brindaría apoyo al profesional neurorrehabilitador, facilitando la toma de decisiones en la aplicación progresiva de terapias dirigidas a la recuperación de funciones perdidas tras el daño cerebral sobrevenido. Del mismo modo, permite una mejora en la efectividad de la biorretroalimentación al paciente. IA: inteligencia artificial. *Adaptación de Rolando et al.*¹⁸

además, es clave. Piénsese, por ejemplo, que en los dispositivos controlados por una interfaz cerebro-máquina la señal de entrada, habitualmente de tipo electroencefalográfico, debe procesarse por *machine learning* para que el sistema aprenda que determinados patrones eléctricos cerebrales corresponden a una intención concreta —e incluso a una palabra o frase— del paciente; esto no sería posible sin IA. Además, la IA también es aplicable a estos dispositivos de asistencia en lo que concierne a su progresiva adaptación al paciente, a la adhesión por parte de este y a una mayor eficiencia de los resultados funcionales²¹.

Área de aplicación neurocognitiva

La afectación cognitiva tras un DCS tiene una elevada frecuencia, del 70% de los casos. Dada su complejidad, requiere una rehabilitación a más largo plazo que la rehabilitación motora. Se dispone de modelos computacionales basados en IA capaces de registrar resultados y su evolución en el tiempo en los juegos terapéuticos indicados al paciente, parametrizando dichos datos y, a partir de estos, seleccionando nuevos ejercicios, posibilitando así un entrenamiento adaptativo. Esto genera una terapia individualizada con monitorización continua que libera de tareas al terapeuta, especialmente cuando este interviene a distancia^{20,26,27}.

DISCUSIÓN

La inclusión de las NNTT en el campo de la neurorehabilitación tuvo ciertas resistencias iniciales, pero a partir de situaciones adversas, como la pandemia de COVID-19, los profesionales dedicados al área se vieron obligados a utilizar de manera inmediata estas herramientas, con muy buena aceptación tanto por ellos como por el paciente y su entorno.

La crítica inicial se enfocó en varias direcciones. Por un lado, se argumentó que estas NNTT carecían de flexibilidad y potencial terapéutico como para diseñar terapias cognitivas individualizadas según la situación clínica y evolutiva de cada paciente, requiriendo por tanto el seguimiento y el manejo clásico por parte del terapeuta. También se arguyó que la comunicación que estos recursos tecnológicos podían tener directamente con el paciente era limitada, de modo que el profesional debía analizar los datos obtenidos para facilitar la comprensión y la adhesión a la terapia. Por otro lado, en relación con la robótica aplicada a la rehabilitación motora, se cuestionó que no tenía capacidad de responder a hechos no predecibles, como por ejemplo que el paciente manifieste algún malestar durante la terapia, de modo que la supervisión por parte del profesional debía ser constante. Finalmente, se objetaron carencias en el uso directo de dicha tecnología para el entrenamiento

en tareas de la vida cotidiana del paciente y en actividades sensoriomotoras complejas, debidas a la falta de grados de libertad y a la ausencia de una interacción eficaz del recurso con la actividad mental del paciente⁸. Sin embargo, han sido precisamente todos estos problemas y limitaciones los que han motivado el avance de estas tecnologías hasta su actual grado de sofisticación, siendo la IA la última en aparecer en escena para solventarlos¹⁹.

Una encuesta realizada por IQVIA en el año 2020, en la que participaron 2804 médicos de diferentes especialidades y ámbitos geográficos de España, 55 gerentes hospitalarios y 19 responsables de sistemas de información de hospitales, concluyó que todos reconocían el valor de implantar las NNTT y la IA en sus centros, la necesidad de establecer estrategias para vencer barreras e incertidumbres que limiten la innovación, y la obligación de hacer un uso correcto y seguro de los datos para optimizar el proceso asistencial con estas herramientas²⁸.

En conclusión, corresponde a los especialistas en neurorrehabilitación reconocer el beneficio que suponen las NNTT, y en especial la IA, así como seguir fomentando su investigación y aplicación clínica, directa y temprana, tanto diagnóstica como terapéutica.

FINANCIACIÓN

El presente trabajo no ha recibido ninguna subvención oficial, beca o apoyo de un programa de investigación destinados a la redacción de su contenido.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no comunican conflicto de intereses en relación con el contenido del trabajo.

RESPONSABILIDADES ÉTICAS

Protección de personas y animales

Los autores declaran que para este trabajo no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos

Los autores declaran que en este trabajo no aparecen datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado

Los autores declaran que en este trabajo no aparecen datos de pacientes.

BIBLIOGRAFÍA

- Feigin VL, Nichols E, Alam T, Bannick MS, Beghi E, Blake N, et al. Global, regional, and national burden of neurological disorders, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016. *Lancet Neurol*. 2019;18:459–80.
- Encuesta de discapacidad, autonomía personal y situaciones de dependencia. Instituto Nacional de Estadística; 2022. [consultado: 16 de diciembre de 2022]. Disponible en: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176782&menu=resultado&idp=1254735573175
- Freeman JA, Hobart JC, Playford ED, Undy B, Thompson AJ. Evaluating neurorehabilitation: lessons from routine data collection. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2005;76:723–8.
- Bayona EA, Bayona Prieto J, León-Sarmiento FE. Neuroplasticidad, neuromodulación y neurorrehabilitación: tres conceptos distintos y un solo fin verdadero. *Salud Un-norte Barranquilla*. 2011;27:95–107.
- Barrett AM, Oh-Park M, Chen P, Ifejeji NL. Neurorehabilitation: five new things. *Neurol Clin Pract*. 2013;3:484–92.
- Vidal-Samsó J. La neurorrehabilitación, un proceso de alta complejidad. *Rev Neurol*. 2020;70:433.
- El Atlas del Ictus. España. Grupo de Estudio de Enfermedades Cerebro Vasculares de la Sociedad Española de Neurología; 2019. [consultado: 16 de diciembre de 2022]. Disponible en: https://www.sen.es/images/2020/atlas/Atlas_del_Ictus_de_Espana_version_web.pdf
- Cano de la Cuerda R, Collado Vázquez S, editores. *Neurorrehabilitación: métodos específicos de valoración y tratamiento*. Madrid: Médica Panamericana; 2012.
- Ereifej ES, Shell CE, Schofield IS, Charkhkar H, Cubrovic I, Dorval AD, et al. Neural engineering: the process, applications, and its role in the future of medicine. *J Neural Eng*. 2021;16:063002.
- Sociedad Española de Neurorrehabilitación. Guía 2: Principios básicos de neurorrehabilitación del paciente con daño cerebral adquirido. Recomendaciones de la Sociedad Española de Neurorrehabilitación. Sociedad Española de Neurorrehabilitación; 2020. [consultado: 16 de diciembre de 2022]. Disponible en: https://www.neurorehab.com/pdf/Guia_SENR_2_Atencion_del_DCS.pdf
- Dietz V, Nef T, Zev Rymer W, editores. *Neurorrehabilitation technology*. London: Springer; 2012.
- Winstein CJ, Stein J, Arena R, Bates B, Cherney LR, Cramer SC, et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery: a guideline for healthcare professionals from the American Heart Association/American Stroke Association. *Stroke*. 2016;47:e98–169.
- Leocani L, Diserens K, Moccia M, Caltagirone C. Disability through COVID-19 pandemic: neurorrehabilitation cannot wait. *Eur J Neurol*. 2020;27:e50–1.
- Laxe S, Ferri J, Juárez-Belaunde A, Ríos-Lago M, Rodríguez-Duarte R, Murie-Fernández M. Neurorehabilitation in the times of Covid-19: insights from the Spanish Neurorehabilitation Society (SENR). *Brain Inj*. 2020;34:1691–2.
- Mao L, Jin H, Wang M, Hu Y, Chen S, He Q, et al. Neurologic manifestations of hospitalized patients with coronavirus disease 2019 in Wuhan, China. *JAMA Neurol*. 2020;77:683–90.
- Hatcher-Martin JM, Adams JL, Anderson ER, Bove R, Burrus TM, Chehrenama M, et al. Telemedicine in neurology: Telemedicine Work Group of the American Academy of Neurology update. *Neurology*. 2020;94:30–8.
- Mantovani E, Zucchella C, Bottioli S, Federico A, Giugno R, Sandrini G, et al. Telemedicine and virtual reality for cognitive rehabilitation: a roadmap for the COVID-19 pandemic. *Front Neurol*. 2020;11:926.
- Lázara RT, Reina-Guerra SG, Quiben MU, editores. *Umphred's. Neurological rehabilitation*. 7th ed. St. Louis: Elsevier; 2020.
- Nizamis K, Athanasiou A, Alimpani S, Dimitrousis C, Astaras A. Converging robotic technologies in targeted neural rehabilitation: a review of emerging solutions and challenges. *Sensors*. 2021;21:2084.
- Sadeghi Esfahlani S, Butt J, Shirvani H. Fusion of artificial intelligence in neuro-rehabilitation video games. *IEEE Access*. 2019;7:102617–27.
- Maier M, Ballester BR, Verschure PFMJ. Principles of neurorehabilitation after stroke based on motor learning and brain plasticity mechanisms. *Front Syst Neurosci*. 2019;13:74.
- Dietz V, Ward NS. *Oxford Textbook of Neurorrehabilitation*. Oxford: Oxford University Press; 2015.
- Avutu SR, Paul S. Artificial intelligence algorithms for healthcare and neurorrehabilitation engineering. En: Sahid Husain M, Muhamad Adnan MHB, Zunnun Khan M, Shukla Fahad U, Khan S, editors. *Pervasive healthcare: a compendium of critical factors for success*. London: Springer; 2022. p. 103–18.
- Freeman JA, Hobart JC, Playford ED, Undy B, Thompson AJ. Evaluating neurorehabilitation: lessons from routine data collection. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2005;76:723–8.
- Kondziella D, Bender A, Diserens K, van Erp W, Estraneo A, Formisano R, et al. European Academy of Neurology guideline on the diagnosis of coma and other disorders of consciousness. *Eur J Neurol*. 2020;27:741–56.
- Almeida Y, Sirsat MS, Bermúdez I, Badia S, Fermé E. AI-Rehab: a framework for AI driven neuro rehabilitation training — the profiling challenge. En: *HEALTHINF 2020 — 13th International Conference on Health Informatics, Proceedings; Part of 13th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies, BIOSTEC 2020*. SciTePress; 2020. p. 845–53.
- Lamberty O, Lehner R, Chua K, Wee SK, Rajeswaran DK, Kuah CWK, et al. Neurorrehabilitation from a distance: can intelligent technology support decentralized access to quality therapy? *Front Robot AI*. 2021;8:612415.
- Aguilar L, De La Fuente G, Priego F, Rebollo P. La visión de los proveedores de salud ante el reto de la incorporación de la inteligencia artificial en la práctica clínica. Madrid: IQVIA; 2022. [consultado: 27 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.iqvia.com/es-es/locations/spain/library/white-papers/la-vision-de-los-proveedores-de-salud-ante-el-reto-de-la-incorporacion-de-la-inteligencia-artificial>