INVESTIGACIÓN en DISCAPACIDAD
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

Métricas objetivas para cuantificar la recuperación funcional de las extremidades superiores de pacientes con lesión medular tras programas de terapias basadas en interfaces cerebro-computadora

Objective metrics for the quantification of the upper extremity functional recovery in patients with spinal cord injury after brain-computer interface-based therapy programs

Martín Emiliano Rodríguez-García[1] ; Ruben Isaac Carino-Escobar[2] ; Mariana Fernanda Mercado-Rivera[3]; Marlene Alejandra Rodríguez-Barragán[4]; Aida Barrera-Ortiz[5] ; Jimena Quinzaños-Fresnedo[6] ; Fabiola Monserrat Palomino-Ramos[7] ;Jessica Cantillo-Negrete[8]

[1]ORCID: 0000-0002-8454-6769, Neurociencias Clínica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México; [2]ORCID: 0000-0001-7075-413X, Sección de Bioelectrónica, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), Ciudad de México, México; [3]División de Rehabilitación Neurológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México; [4]ORCID: 0000-0002-3234-4815, División de Rehabilitación Neurológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México; [5]División de Rehabilitación Neurológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México ; [6]ORCID: 0000-0002-2780-6878; División de Rehabilitación Neurológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México [7]División de Rehabilitación Neurológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México; [8]ORCID: 0000-0002-8453-1807, Subdirección de Investigación Tecnológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México.

RESUMEN

La lesión medular (LM) a nivel cervical produce afectaciones motoras importantes en las extremidades superiores (ES), impactando negativamente la independencia funcional de los pacientes. Aunque las terapias convencionales pueden ser benéficas en el proceso de rehabilitación, su efectividad está limitada por factores como la interrupción de vías de comunicación motoras y la falta de retroalimentación que los pacientes reciben. Por esto, las interfaces cerebro-computadora (ICC) han surgido como una opción terapéutica complementaria prometedora. Las ICC decodifican las señales del sistema nervioso central (SNC) para producir retroalimentación al paciente, promoviendo procesos de neuroplasticidad. Actualmente, el estándar para evaluar el impacto de estas intervenciones basadas en ICC consiste en aplicar escalas clínicas y analizar los puntajes obtenidos. Sin embargo, estas escalas contienen componentes subjetivos que resaltan la necesidad de incorporar mediciones cuantitativas objetivas para la evaluación de la eficacia y efectividad clínica de las ICC. El objetivo de esta revisión narrativa fue sintetizar métricas de cuantificación de la función del SNC y de las ES de pacientes con LM tras concluir un programa de rehabilitación para ES basado en ICC, además de presentar perspectivas a futuro de este campo. Si bien estas métricas muestran potencial como posibles biomarcadores de recuperación, aún es necesario resolver algunas limitaciones, como la falta de estandarización en la adquisición y el análisis de datos. A pesar de esto, la evidencia sugiere que el uso de métricas cuantitativas objetivas ofrecería una caracterización más completa y robusta del proceso de rehabilitación motora de ES posterior a una LM.

ABSTRACT

Spinal cord injury (SCI) at the cervical level produces significant motor impairments in the upper extremity (UE), negatively affecting patients' functional independence. Although conventional therapies can be beneficial in the rehabilitation process, their effectiveness is limited by factors such as disruption of motor communication pathways and the lack of feedback that the patients receive. Because of this, brain-computer interfaces (BCI) have emerged as a promising complementary therapeutic option. BCI decode central nervous system information to produce feedback, promoting neuroplasticity mechanisms. Currently, the standard to assess the impact of BCI-based interventions comprises the use of clinical scales and the analysis of the obtained scores. However, these scales involve subjective components that showcase the need to incorporate objective quantitative measurements to assess the clinical efficacy and effectiveness of the BCI. The objective of this narrative review was to synthesize quantification metrics of the CNS and the UE function of patients with SCI after completing a BCI-based UE rehabilitation program, and to present future perspectives of the field. Although these metrics show potential as possible biomarkers of recovery, several limitations still need

Palabras clave:
Electroencefalografía, fuerza de agarre, interfaz cerebro-máquina, lesión medular, neurorrehabilitación.

Keywords:
Electroencephalography, grip strength, brain-machine interface, spinal cord injury, neurorehabilitation.

Correspondencia:
Jessica Cantillo-Negrete
Afiliación: Subdirección de Investigación Tecnológica, Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra, Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-8453-1807
Email: jcantillo@inr.gob.mx
Dirección postal: Calzada México Xochimilco No. 289, Colonia Arenal de Guadalupe, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14389.

Edited by
Editor-in-chief:
Iván Pérez-Neri
Co-editor:
José Luis Cortés Altamirano
Section editor:
Oscar Arias-Carrión

Received: june 4th 2026
Accepted: november 6th 2026

CONTRIBUCIONES DE AUTORES
Martín Emiliano Rodríguez-García: Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción (borrador original).
Ruben I. Carino-Escobar: Metodología, Visualización, Redacción (revisión y edición).
Mariana F. Mercado-Rivera: Investigación, Metodología, Redacción (revisión y edición).
Marlene A. Rodríguez-Barragán: Metodología, Redacción (revisión y edición).
Aida Barrera-Ortiz: Metodología, Redacción (revisión y edición).
Jimena Quinzaños-Fresnedo: Metodología, Redacción (revisión y edición).
Fabiola M. Palominos-Ramos: Metodología, Redacción (revisión y edición).
Jessica Cantillo-Negrete: Conceptualización, Metodología, Administración del proyecto, Visualización, Redacción (revisión y edición).

DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO
El presente estudio no recibió financiamiento gubernamental, académico, comercial o de alguna otra organización.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS
Los autores señalan que no hay conflictos de interés que declarar

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

Investigación en Discapacidad
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

to be addressed, including a lack of standardization in data acquisition and analysis. Despite these constraints, evidence suggests that the use of objective quantitative metrics could provide a more complete and robust characterization of the motor rehabilitation process of the UE after a SCI.

INTRODUCCIÓN

La lesión medular (LM) es una afectación del sistema nervioso central cuya gravedad depende principalmente del nivel anatómico (cervical, torácico, lumbar) y de la extensión de la lesión (completa o incompleta) [1]. En particular, las lesiones cervicales representan un gran desafío clínico y de rehabilitación, pues afectan no solo las funciones de extremidades inferiores, sino también la función motora y sensitiva de la extremidad superior (ES) izquierda y derecha [2]. Estas afectaciones en la ES comprometen aspectos esenciales para la independencia del paciente, tales como la manipulación de objetos, la alimentación, el aseo personal y la capacidad de participar en actividades de la vida diaria [3].

Las terapias de rehabilitación convencionales para ES, como la terapia física y la terapia ocupacional, han mostrado ser benéficas para los pacientes [4]. Sin embargo, distintos obstáculos clínicos limitan su efectividad, como la interrupción parcial o total de vías motoras descendentes, la inhibición por espasticidad y la limitada retroalimentación sensorial que estas terapias pueden proporcionar [5].

Debido a esto, recientemente se han explorado técnicas alternativas y experimentales para rehabilitación de la ES, como las intervenciones basadas en interfaces cerebro-computadora (ICC), las cuales se basan en decodificar señales del cerebro para controlar dispositivos externos que generen una retroalimentación, por ejemplo, visual o somatosensorial, buscando inducir mecanismos de neuroplasticidad [6,7]. En la LM, se ha teorizado que las ICC podrían establecer "puentes" funcionales que restablezcan parcialmente la comunicación entre la corteza cerebral y los músculos, ya sea mediante estimulación muscular, estimulación eléctrica funcional (EEF) o mediante mecanismos híbridos que combinen las ICC con dos o más tipos de retroalimentación [7,8].

Actualmente, el estándar de oro para medir el impacto que tiene una terapia para rehabilitación motora de ES en pacientes con LM, incluyendo las intervenciones ICC, son las escalas clínicas, como la *Action Research Arm Test* [9], la *Spinal Cord Independence Measure* [10], la *Manual Muscle Test* [11], el *Upper Extremity Motor Score* [12] o el *Capabilities of Upper Extremity-Questionnaire* [13]. En estas escalas, un experto clínico asigna un puntaje de acuerdo con la capacidad del paciente para realizar distintas tareas motoras o actividades de la vida diaria. Sin embargo, estos criterios tienen un componente subjetivo al depender de la experiencia del clínico que aplica la escala, del nivel de fatiga y del grado de cooperación del paciente durante la prueba [14,15]. Por lo tanto, resultaría útil emplear métricas cuantitativas derivadas de la propia fisiología del paciente, de manera que permitan una evaluación objetiva del estado funcional de la ES tras la LM.

En algunos estudios que reportan la evaluación de sistemas ICC para rehabilitación motora de ES, se han calculado métricas cuantitativas objetivas para analizar los cambios que presentan los pacientes tras la intervención. Por ejemplo, es posible derivar métricas de estudios neurofisiológicos, como el electroencefalograma (EEG) o la estimulación magnética transcraneal [16,17], que representen el nivel de actividad cerebral producida en los pacientes al intentar mover su ES. También, estudios biomecánicos permiten cuantificar, por ejemplo, el rango de movimiento en distintas articulaciones para evaluar si la terapia proporcionada tuvo algún impacto sobre la capacidad de movimiento de los pacientes [18]. De manera similar, estudios de fuerza evalúan si los pacientes incrementaron el nivel de contracción muscular que pueden ejercer durante tareas de sujeción [19], similar a lo realizado en tareas de la vida cotidiana. Esto indica que existen distintas métricas cuantitativas objetivas que permiten analizar el estado funcional del sistema nervioso central, el movimiento de articulaciones y el nivel de fuerza ejercida para, a su vez, evaluar

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

cambios en la recuperación funcional de la ES en pacientes con LM.

Dada esta amplia variabilidad metodológica, resulta relevante recopilar la información existente de las métricas cuantitativas objetivas utilizadas en estudios clínicos donde se proporciona un programa de rehabilitación motora para ES basado en una ICC para pacientes con LM. En esta revisión narrativa, se presentan métricas cuantitativas objetivas utilizadas para evaluar los cambios neurofisiológicos, biomecánicos y de fuerza que presentan los pacientes con LM al concluir una intervención basada en ICC, sugiriendo un posible uso como biomarcador de recuperación. Este tipo de revisión permitió identificar tendencias, desafíos y opciones de mejora en este campo de investigación en desarrollo y con alta heterogeneidad [20]. El objetivo de este trabajo fue sintetizar los métodos de cuantificación del estado funcional del sistema nervioso central y de las ES de pacientes con LM tras una intervención ICC y presentar perspectivas a futuro de este campo de investigación.

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos en la literatura siguiendo el método PICO dada su utilidad para responder distintos tipos de pregunta de investigación [21]. Los componentes de este método fueron conformados de la siguiente manera: población (P): pacientes con lesión medular; intervención (I): terapias ICC para rehabilitación motora de extremidad superior; comparación (C): sin comparación directa a la intervención seleccionada; y desenlace (*outcome*, O): métricas propuestas para la cuantificación objetiva de cambios fisiológicos. Esta búsqueda se realizó en las bases de datos de PubMed, IEEE Xplore, Cochrane Library y Web of Science utilizando combinaciones de los términos mostrados en la Figura 1. Los artículos incluidos fueron publicados en idioma inglés previo a junio de 2025.

Una vez completada la búsqueda, se eliminaron los artículos duplicados y se realizó la evaluación del resumen para determinar si respondían las siguientes preguntas: 1) ¿Se menciona la inclusión de participantes con LM o tetraplejia? 2) ¿Se menciona la aplicación de una intervención para rehabilitación motora de la ES basada en ICC no invasiva? y 3) ¿Corresponde a un artículo original de un estudio prospectivo preclínico o clínico? Si la respuesta para todas estas preguntas fue positiva, se procedió con la extracción de información relacionada con los participantes reclutados, la intervención proporcionada y las métricas utilizadas para evaluar el impacto de la terapia en la función motora de las extremidades superiores. Dos revisores realizaron tanto la búsqueda de artículos como la evaluación de resúmenes de manera independiente. Cualquier desacuerdo en las respuestas de los revisores fue resuelto con la intervención de un tercer revisor.

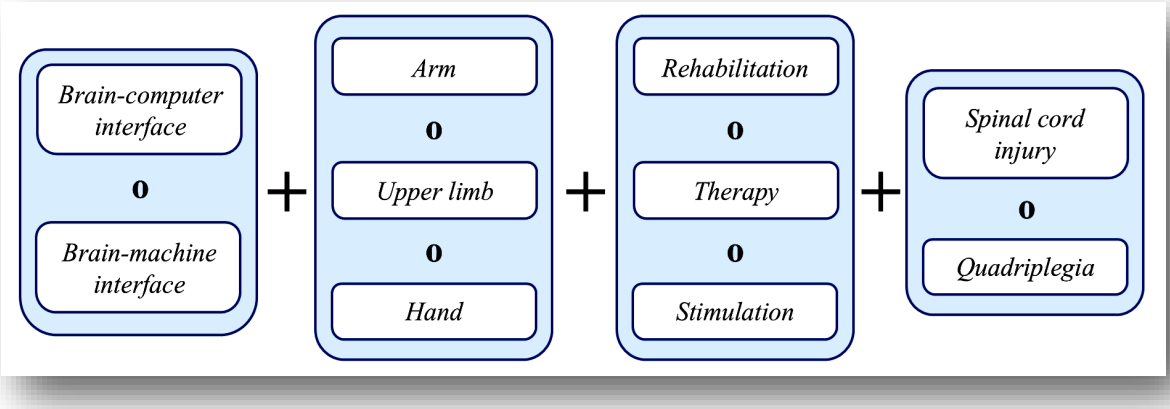


Figura 1. Términos en inglés utilizados para la búsqueda de artículos. Se seleccionó únicamente un término de cada bloque y se combinaron los 4 términos elegidos para realizar una búsqueda. En total, se realizaron 36 búsquedas en cada base de datos empleada dadas las posibles combinaciones de términos.

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

Investigación en Discapacidad
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

RESULTADOS

La búsqueda realizada produjo 337 artículos tras la eliminación de trabajos duplicados. De estos, 16 artículos fueron incluidos en esta revisión tras la evaluación de resúmenes. En estos trabajos se reportaron distintos métodos para cuantificar cambios fisiológicos producidos en pacientes con LM tras una intervención ICC no invasiva. En la Figura 2 se presenta un resumen de las métricas cuantitativas reportadas junto con un esquema representativo de una terapia con un sistema ICC. Estas métricas se detallan en las siguientes subsecciones.

Métricas cuantitativas objetivas

Potenciales evocados somatosensoriales

Una técnica frecuentemente utilizada para adquirir información del sistema nervioso central en sistemas ICC y para evaluar cambios neurofisiológicos en pacientes con patologías neurológicas es el EEG. Esta técnica registra la actividad neuronal sobre la corteza cerebral con una alta resolución temporal, aunque con baja resolución espacial. Existen diferentes características que pueden ser extraídas del EEG para cuantificar objetivamente cambios neurofisiológicos en pacientes con LM. Por ejemplo, al analizar esta señal en el dominio del tiempo es posible medir la latencia y la amplitud de los potenciales evocados somatosensoriales (PESS) [22,23], los cuales se producen en la actividad eléctrica del cerebro en respuesta a un estímulo relacionado con la propiocepción o la mecanorecepción [24,25]. Estudiar los PESS permite evaluar el tiempo de aparición y el valor máximo del pico N20, el cual es esperado 20 ms posterior a la estimulación eléctrica en la ES. En casos de LM donde las fibras nerviosas están severamente afectadas, la latencia del N20 aumenta mientras que su amplitud disminuye debido a desmielinización [26,27]. Por lo tanto, una reducción en latencia y un aumento de amplitud indicaría un proceso de recuperación en el sistema nervioso central y periférico. En particular, se ha reportado que, tras estimular los nervios cubital y mediano de ambos brazos, 7 pacientes con LM que recibieron una terapia basada en ICC con EEF como

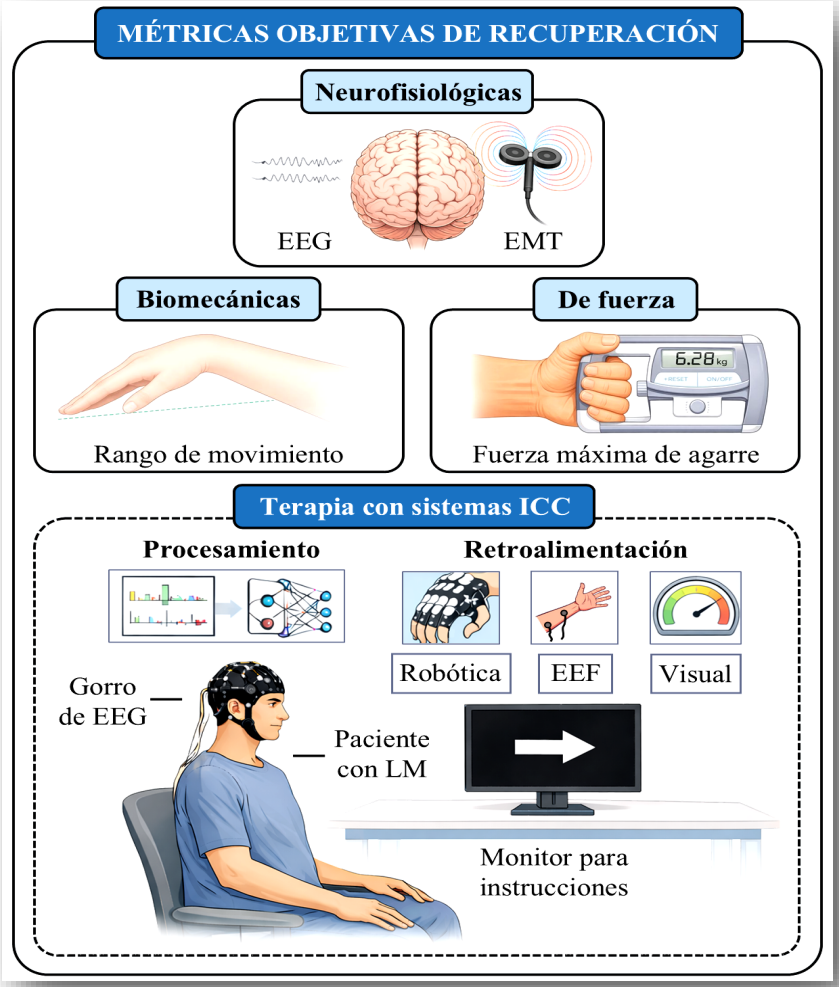


Figura 2. Métricas empleadas para cuantificar la recuperación de pacientes con lesión medular (LM) tras concluir una terapia de rehabilitación de extremidad superior (ES) basada en un sistema de interfaz cerebro-computadora (ICC) no invasiva. También, se muestran los componentes representativos de dicho sistema, como la adquisición de electroencefalograma (EEG), el procesamiento de señales y el tipo de retroalimentación proporcionada. EMT: estimulación magnética transcraneal; EEF: estimulación eléctrica funcional.

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

retroalimentación (terapia ICC-EEF) mostraron, en promedio, una disminución en la latencia y una mayor amplitud del N20, mientras que 4 pacientes a quienes se les aplicó EEF sin que fuera controlada mediante una ICC presentaron un ligero aumento en la latencia de este PESS sin cambios relevantes en su amplitud [22]. Esto sugiere que las intervenciones basadas en ICC podrían tener un impacto benéfico en la recuperación funcional de la ES.

Reactividad de ojos cerrados a ojos abiertos

El análisis del EEG en el dominio de la frecuencia también puede proporcionar información relevante asociada a la rehabilitación de ES de pacientes con LM tras una terapia ICC. Por ejemplo, la reactividad de ojos cerrados a ojos abiertos (OC/OA), i.e. la relación de potencia del EEG durante OC entre la obtenida durante OA, podría ser un indicador de la capacidad cognitiva de los pacientes [28]. Se ha observado que la reactividad de OC/OA se encuentra disminuida en pacientes con LM en comparación con sujetos sanos, lo cual es atribuido a una posible disritmia talamocortical [29]. En particular, un estudio reportó que 3 pacientes que recibieron una terapia ICC-EEF en conjunto con terapia física, mostraron una reactividad de OC/OA significativamente mayor que 3 pacientes que únicamente recibieron la terapia física [30]. Esto podría indicar un mejor desenlace neurofisiológico, sugiriendo un posible efecto positivo en la función talamocortical cerebral [30], tras incluir un sistema ICC y EEF en el programa de rehabilitación.

Desincronización/sincronización relacionada a eventos

El grado de actividad cortical producida durante la ejecución de tareas de movimiento se puede evaluar mediante la desincronización/sincronización relacionada a eventos (DRE/SRE) [31]. Esta métrica representa los cambios en potencia espectral del EEG durante la ejecución de alguna tarea motora de la ES con respecto a la potencia durante un periodo de reposo [31,32]. Por ejemplo, se ha reportado desincronización relacionada a eventos (DRE), asociada a actividad cerebral, más pronunciada en el hemisferio contralateral de un paciente diestro con LM al intentar mover su ES dominante tras 4 sesiones de terapia ICC con retroalimentación visual [33]. Esto sugirió mayor actividad neuronal en dicho hemisferio, lo que podría propiciar mecanismos de potenciación a largo plazo que favorezcan la recuperación funcional [32,34]. Esta métrica también se ha utilizado para cuantificar el nivel de focalización de la actividad neuronal. Por ejemplo, un paciente con LM que recibió un acondicionamiento con estimulación espinal eléctrica transcutánea previo a sesiones de terapia con un sistema ICC y retroalimentación visual, mostró, conforme avanzó la intervención, DRE más pronunciada en el hemisferio contralateral al intentar mover cada una de sus ES [35]. Otra utilidad de la DRE/SRE ha sido en la determinación de aquellas bandas de frecuencia que facilitan la distinción de tareas de movimiento por parte de una ICC [36,37]. Esto es relevante ya que permitiría que el paciente reciba una mayor cantidad de retroalimentación y, por lo tanto, un mayor entrenamiento durante su proceso de rehabilitación.

También, se ha estudiado el cambio producido en la distribución espacial de la DRE tras programas de rehabilitación con ICC en pacientes con LM [22,23]. En una prueba piloto, se observó un patrón de activación cerebral en los ritmos alfa y beta no significativo en ambos hemisferios (bilateral) de 4 pacientes durante el movimiento del brazo estimulado (derecho o izquierdo) al concluir una intervención ICC-EEF para rehabilitación de ES [23]. En otro estudio, se reportó una disminución de la potencia en las bandas alfa y beta de ambos hemisferios cerebrales en 8 pacientes con LM, produciendo así un patrón bilateral de actividad al realizar imaginación de movimiento con la mano derecha durante una intervención ICC-EEF [38]. Sin embargo, en un ensayo clínico con 12 pacientes reclutados, se reportó una lateralización significativa de la DRE en algunos canales de EEG hacia el hemisferio contralateral en el grupo de pacientes que recibió una terapia ICC-EEF, lo cual no fue observado en el grupo de pacientes que solo recibieron EEF [22]. En particular, esta lateralización se reportó en los ritmos cerebrales mu y beta al

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

Investigación en Discapacidad
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

intentar mover la mano izquierda, y en los ritmos theta y beta al intentar mover la mano derecha [22].

La DRE también se ha calculado a partir de datos de magnetoencefalografía, la cual mide la inducción magnética generada por la corriente iónica producida entre y a través de las neuronas [39]. Por ejemplo, tras una intervención ICC con retroalimentación visual, se observó un aumento significativo en la DRE, i.e. en el nivel de actividad cerebral, del área sensoriomotora de ES en 4 de 7 pacientes con LM al intentar mover su mano dominante [40]. Cabe recalcar que los 3 pacientes que no presentaron incrementos significativos en la DRE mostraron una ausencia de fuerza de agarre previo al inicio de la intervención. También, se ha reportado una modulación significativa en los ritmos alfa y beta durante el movimiento de la ES dominante en 2 pacientes diestros con LM a lo largo de una única sesión en una prueba de concepto de un sistema ICC con retroalimentación visual [41]. En particular, se observó una DRE más pronunciada en estos ritmos conforme avanzó el entrenamiento ICC.

En conjunto, estos trabajos indican que la DRE/SRE, en particular la DRE, podría ser relevante en la evaluación de cambios en la función cerebral de los pacientes con LM tras una terapia ICC de rehabilitación para ES. Esta métrica señala la posibilidad de analizar objetivamente el grado en el que los sistemas ICC inducen mecanismos de neuroplasticidad y su impacto tanto en el nivel de actividad en la corteza cerebral, como en su lateralización y focalización.

Área de excitabilidad cortical

Estudiar la actividad cerebral es importante para la evaluación de la recuperación funcional de pacientes con LM. No obstante, también es relevante analizar cambios en la excitabilidad corticoespinal para evaluar la integridad de la vía de comunicación motora para ES en pacientes con LM tras una intervención ICC. Para esto, se ha explorado el uso de la estimulación magnética transcraneal para evaluar el cambio en el tamaño del área excitable que producen potenciales evocados motores (PEM) en músculos de interés [42]. Por ejemplo, esta técnica se utilizó para producir PEM en el músculo abductor corto del pulgar de ambas ES en dos pacientes con LM [42]. Dada la relevancia de este músculo durante la sujeción de objetos, un aumento del área de su representación cortical indicaría una zona de mayor tamaño donde es posible producir PEM con estimulación magnética transcraneal. Esto podría sugerir mayor excitabilidad corticoespinal y, a su vez, indicios de una recuperación funcional. En este estudio, se reportó que un paciente mostró un incremento en el área cortical asociada al abductor corto del pulgar de ambas ES tras 12 sesiones de terapia con estimulación nerviosa periférica controlada por ICC [42]. Sin embargo, en el segundo paciente no se registraron PEM antes o después de la intervención al estimular el hemisferio izquierdo, mientras que en el hemisferio derecho no se observó cambio en el tamaño del área cortical excitable [42]. Esto sugiere que, aunque la estimulación magnética transcraneal podría ser una técnica prometedora, es necesario continuar evaluando el impacto del tamaño del área excitable sobre la recuperación funcional posterior a una LM.

Rango de movimiento

Los estudios biomecánicos otorgan información de la capacidad de movimiento en articulaciones y músculos de pacientes con LM. En particular, se ha estudiado el rango de movimiento producido en distintas articulaciones de la ES al realizar movimientos específicos utilizando goniómetros. Tras una LM, se ha reportado un rango de movimiento disminuido en articulaciones como la muñeca en comparación con sujetos sanos, por lo que es relevante analizar si las articulaciones de los pacientes presentan un incremento en su capacidad máxima de movimiento. Por ejemplo, 5 pacientes que participaron en una intervención ICC-EEF incrementaron su rango de movimiento en la muñeca de ambas ES tras 20 sesiones de terapia [22], indicando una mejora en la función motora de ES. No obstante, otros estudios han reportado resultados contrastantes. En un estudio de factibilidad se reportó que 2 de 3 pacientes presentaron incrementos en el rango de movimiento de ambas muñecas, sin embargo, este cambio no se pudo atribuir completamente a la terapia ICC-EEF proporcionada

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

ya que los pacientes recibieron simultáneamente terapia física para ES [43]. Además, otro estudio que proporcionó ICC-EEF y terapia física a 10 pacientes con LM indicaron una ausencia de cambios significativos en el rango de movimiento del codo, la muñeca y el pulgar de ambas ES [30]. En conjunto, esta información sugiere el potencial del rango de movimiento de distintas articulaciones como indicador de la recuperación funcional de ES, y muestra la necesidad de continuar evaluando la robustez de esta métrica con una población más amplia de pacientes.

Fuerza máxima de agarre

Otro método de cuantificación de la rehabilitación motora de ES de los pacientes con LM tras una intervención ICC es el cálculo de su fuerza máxima de agarre, obtenida mediante dinamómetros. Se ha reportado que esta fuerza puede aumentar en las ES de los pacientes tras solo una sesión de terapia [40]. Sin embargo, esta mejora solo se ha encontrado en un bajo número de pacientes que presentan fuerza residual previo a la intervención [40,42,44]. Además, en un estudio de factibilidad se reportó una ausencia de cambios significativos en la fuerza máxima de agarre de 10 pacientes tras un programa ICC-EEF en conjunto con terapia física [30]. Esto indica que es necesario continuar investigando si esta métrica refleja confiablemente la evolución de la función motora de ES en los pacientes, aun cuando la fuerza máxima de agarre sea usada regularmente para analizar cambios en la función de la ES tras una LM.

Perspectivas a futuro

Las métricas cuantitativas representan una forma de evaluar objetivamente la evolución de pacientes con LM en su proceso de recuperación funcional de las ES. En particular, las métricas neurofisiológicas, biomecánicas y de fuerza muestran potencial como biomarcadores de la rehabilitación motora de ES tras una intervención ICC. Sin embargo, estas métricas también presentan limitaciones metodológicas importantes, como la relativa baja cantidad de estudios en los que son utilizadas, la pequeña muestra reclutada, la heterogeneidad en las intervenciones proporcionadas y la falta de estandarización en la adquisición y el análisis de datos.

Para sobrellevar estas limitaciones, es necesario, primero, incrementar el número de estudios realizados y la cantidad de pacientes reclutados para validar el uso de estas métricas. En particular, la mayoría de los estudios aquí presentados corresponden a pruebas piloto, de factibilidad o preclínicas con un número reducido de pacientes reclutados, lo que limita la evidencia obtenida sobre la utilidad y la robustez de las métricas derivadas para evaluar la recuperación funcional de los pacientes. Por lo tanto, resultaría benéfico que futuros estudios involucren ensayos clínicos con un mayor número de pacientes reclutados, donde se planeen evaluaciones longitudinales de la función motora de ES y el análisis de la correlación de métricas con puntajes de escalas clínicas, con el objetivo de establecer la factibilidad del uso de métricas cuantitativas dentro de programas de rehabilitación con sistemas ICC. Esto podría ser especialmente relevante para aquellas métricas derivadas de estudios biomecánicos y de fuerza debido a la gran variabilidad mostrada en sus resultados.

También, dada la heterogeneidad en la información que proveen las métricas calculadas, como la DRE, la latencia de los PESS o la fuerza máxima de agarre, se dificulta la comparación entre estudios y la generalización de resultados, por lo que se debe buscar que futuros trabajos sigan una metodología unificada, incluyendo parámetros de adquisición y procesamiento de bioseñales, para validar la robustez y la viabilidad de estas métricas. Esto permitiría cuantificar el proceso de rehabilitación de pacientes con LM que, incluso, se encuentren en diferentes etapas del proceso de recuperación.

Por otra parte, resultaría relevante integrar múltiples modalidades a la evaluación cuantitativa para caracterizar de manera más completa el estado funcional de la ES del paciente. Sin embargo, es necesario considerar el tiempo requerido para realizar cada evaluación. Dada la evidencia

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

INVESTIGACIÓN en DISCAPACIDAD
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

presentada, los estudios de EEG y de rango de movimiento representan las opciones con mayor respaldo de la literatura para caracterizar objetivamente el proceso de recuperación de los pacientes con LM. Además, para realizar una evaluación más robusta de los cambios presentados en el sistema nervioso central, resultaría útil incorporar técnicas no invasivas que otorguen información fisiológica con mayor resolución espacial que las mencionadas anteriormente, como la resonancia magnética estructural y funcional o la espectroscopía funcional de infrarrojo cercano [45,46]. Este enfoque integrativo podría facilitar el desarrollo de modelos cuantitativos de recuperación motora, capaces de mostrar asociaciones entre distintas características fisiológicas de los pacientes con LM.

Asimismo, es necesario considerar las distintas características clínicas que presentan diferentes poblaciones de pacientes. Por ejemplo, la variabilidad existente en el nivel de lesión, el tiempo posterior a la lesión y las capacidades funcionales residuales sugiere que no existe un único patrón de recuperación, por lo que las métricas cuantitativas derivadas de estudios neurofisiológicos, biomecánicos o de fuerza también cambiarán de acuerdo con estas características. De manera similar, resulta relevante considerar el impacto que tienen las distintas intervenciones ICC en la evolución de los pacientes y, por lo tanto, en las métricas obtenidas. Por ejemplo, una terapia ICC-EEF podría impactar de manera diferente al sistema nervioso central o periférico que una terapia donde se provee estimulación eléctrica transcutánea o una retroalimentación visual.

En conjunto, estas perspectivas indican un campo de estudio en continuo cambio y evolución, en el que la estandarización metodológica, la integración multimodal y la validación de métricas serán los pilares fundamentales para consolidar el uso de mediciones cuantitativas como herramientas fiables y objetivas en el proceso de recuperación funcional de ES tras una LM.

CONCLUSIÓN

La evidencia presentada en esta revisión narrativa indica que las métricas cuantitativas derivadas de estudios neurofisiológicos, biomecánicos y de fuerza constituyen herramientas prometedoras para evaluar de manera objetiva la recuperación funcional de las ES en pacientes con LM. En conjunto, las métricas aquí descritas señalan patrones de reorganización cortical, cambios en la excitabilidad del sistema nervioso central y periférico, y modificaciones en la capacidad motora y de fuerza, indicando su potencial como biomarcadores del impacto que tienen las intervenciones basadas en ICC sobre la función motora de ES.

La evidencia presentada señala un campo en constante evolución, donde aún se requiere una mayor cantidad de estudios con poblaciones más amplias, diseños de estudio longitudinales y metodologías estandarizadas. Sin embargo, las métricas cuantitativas presentadas muestran el potencial de fungir como herramientas de medición objetivas del proceso de recuperación funcional de la ES en pacientes con LM que reciben terapias ICC. La validación de estas métricas resultaría relevante para la evaluación personalizada del proceso de rehabilitación y en el diseño de intervenciones más benéficas para pacientes con LM.

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

REFERENCIAS

1. Silva NA, Sousa N, Reis RL, Salgado AJ. From basics to clinical: A comprehensive review on spinal cord injury. Prog Neurobiol [Internet]. 2014;114:25–57. https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2013.11.002
2. Walker JR, Detloff MR. Plasticity in Cervical Motor Circuits following Spinal Cord Injury and Rehabilitation. Biology (Basel) [Internet]. 2021;10. https://doi.org/10.3390/biology10100976
3. Lili L, Sunnerhagen KS, Rekand T, Alt Murphy M. Independence and upper extremity functioning after spinal cord injury: a cross-sectional study. Sci Rep [Internet]. 2023;13:3148. https://doi.org/10.1038/s41598-023-29986-y
4. Wang TY, Park C, Zhang H, Rahimpour S, Murphy KR, Goodwin CR, et al. Management of Acute Traumatic Spinal Cord Injury: A Review of the Literature. Front Surg [Internet]. 2021;Volume 8-2021. https://doi.org/10.3389/fsurg.2021.698736
5. Harkema S, Gerasimenko Y, Hodes J, Burdick J, Angeli C, Chen Y, et al. Effect of epidural stimulation of the lumbosacral spinal cord on voluntary movement, standing, and assisted stepping after motor complete paraplegia: a case study. The Lancet [Internet]. Elsevier; 2011;377:1938–47. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60547-3
6. Daly JJ, Wolpaw JR. Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. Lancet Neurol [Internet]. Elsevier; 2008;7:1032–43. https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70223-0
7. Merante A, Zhang Y, Kumar S, Nam CS. Brain–Computer Interfaces for Spinal Cord Injury Rehabilitation. In: Nam CS, editor. Neuroergonomics: Principles and Practice [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 315–28. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34784-0_16
8. Lebedev MA, Nicolelis MAL. Brain-Machine Interfaces: From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation. Physiol Rev [Internet]. American Physiological Society; 2017;97:767–837. https://doi.org/10.1152/physrev.00027.2016
9. Lili L, S Sunnerhagen K, Rekand T, Alt Murphy M. Associations between upper extremity functioning and kinematics in people with spinal cord injury. J Neuroeng Rehabil. BioMed Central Ltd; 2021;18. https://doi.org/10.1186/s12984-021-00938-9
10. Itzkovich M, Shefler H, Front L, Gur-Pollack R, Elkayam K, Bluvshtein V, et al. SCIM III (Spinal Cord Independence Measure version III): reliability of assessment by interview and comparison with assessment by observation. Spinal Cord [Internet]. 2018;56:46–51. https://doi.org/10.1038/sc.2017.97
11. Cuthbert SC, Goodheart GJ. On the reliability and validity of manual muscle testing: a literature review. Chiropr Osteopat [Internet]. 2007;15:4. https://doi.org/10.1186/1746-1340-15-4
12. Marino RJ, Burns S, Graves DE, Leiby BE, Kirshblum S, Lammertse DP. Upper- and lower-extremity motor recovery after traumatic cervical spinal cord injury: An update from the national spinal cord injury database. Arch Phys Med Rehabil. 2011;92:369–75. https://doi.org/10.1016/j.apmr.2010.09.027
13. Oleson C V., Marino RJ. Responsiveness and concurrent validity of the revised Capabilities of Upper Extremity-Questionnaire (CUE-Q) in patients with acute tetraplegia. Spinal Cord. Nature Publishing Group; 2014;52:625–8. https://doi.org/10.1038/sc.2014.77
14. Nordin Å, Murphy MA, Danielsson A. Intra-rater and inter-rater reliability at the item level of the Action Research arm test for patients with stroke. J Rehabil Med. Foundation for Rehabilitation Information; 2014;46:738–45. https://doi.org/10.2340/16501977-1831
15. Gladstone DJ, Danells CJ, Black SE. The fugl-meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties. Neurorehabil Neural Repair. United States; 2002;16:232–40. https://doi.org/10.1177/154596802401105171
16. Ofner P, Schwarz A, Pereira J, Wyss D, Wildburger R, Müller-Putz GR. Attempted Arm and Hand Movements can be Decoded from Low-Frequency EEG from Persons with Spinal Cord Injury. Sci Rep. Nature Publishing Group; 2019;9. https://doi.org/10.1038/s41598-019-43594-9
17. Ajiboye AB, Willett FR, Young DR, Memberg WD, Murphy BA, Miller JP, et al. Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration. The Lancet [Internet]. Elsevier; 2017;389:1821–30. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30601-3
18. Bellitto A, Luca A De, Gamba S, Losio L, Massone A, Casadio M, et al. Clinical, Kinematic and Muscle Assessment of Bilateral Coordinated Upper-Limb Movements Following Cervical Spinal Cord Injury. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2023;31:3607–18. https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3309539
19. Neto FR, Gomes Costa RR, Dorneles JR, Gonçalves CW, Veloso JHCL, Carregaro RL. Handgrip Strength Cutoff Points for Functional Independence and Wheelchair Ability in Men With Spinal Cord Injury. Top Spinal Cord Inj Rehabil [Internet]. 2021;27:60–9. https://doi.org/10.46292/sci20-00040
20. Ferrari R. Writing narrative style literature reviews. Medical Writing. 2015;24:230–5. https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329
21. Nishikawa-Pacher A. Research Questions with PICO: A Universal Mnemonic. Publications. MDPI; 2022;10. https://doi.org/10.3390/publications10030021
22. Osuagwu BCA, Wallace L, Fraser M, Vuckovic A. Rehabilitation of hand in subacute tetraplegic patients based on brain computer interface and functional electrical stimulation: A randomised pilot study. J Neural Eng. Institute of Physics Publishing; 2016;13. https://doi.org/10.1088/1741-2560/13/6/065002
23. Trincado-Alonso F, López-Larraz E, Resquín F, Ardanza A, Pérez-Nombela S, Pons JL, et al. A Pilot Study of Brain-Triggered Electrical Stimulation with Visual Feedback in Patients with Incomplete Spinal Cord Injury. J Med Biol Eng. Springer Berlin Heidelberg; 2018;38:790–803. https://doi.org/10.1007/s40846-017-0343-0
24. Cruccu G, Aminoff MJ, Curio G, Guerit JM, Kakigi R, Mauguiere F, et al. Recommendations for the clinical use of somatosensory-evoked potentials. Clinical Neurophysiology [Internet]. 2008;119:1705–19. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.03.016
25. Maudrich T, Hähner S, Kenville R, Ragert P. Somatosensory-Evoked Potentials as a Marker of Functional Neuroplasticity in Athletes: A Systematic Review. Front Physiol [Internet]. 2022;Volume 12-2021. https://doi.org/10.3389/fphys.2021.821605
26. Curt A, Dietz V. Electrophysiological recordings in patients with spinal cord injury: significance for predicting outcome. Spinal Cord [Internet]. 1999;37:157–65. https://doi.org/10.1038/sj.sc.3100809
27. Spiess M, Schubert M, Kliesch U, Halder P. Evolution of tibial SSEP after traumatic spinal cord injury: Baseline for clinical trials. Clinical Neurophysiology [Internet]. 2008;119:1051–61. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.01.021
28. Wan L, Huang H, Schwab N, Tanner J, Rajan A, Lam NB, et al. From eyes-closed to eyes-open: Role of cholinergic projections in EC-to-EO alpha reactivity revealed by combining EEG and MRI. Hum Brain Mapp [Internet]. John Wiley & Sons, Ltd; 2019;40:566–77. https://doi.org/10.1002/hbm.24395
29. Boord P, Siddall PJ, Tran Y, Herbert D, Middleton J, Craig A. Electroencephalographic slowing and reduced reactivity in neuropathic pain following spinal cord injury. Spinal Cord [Internet]. 2008;46:118–23. https://doi.org/10.1038/sj.sc.3102077
30. Kumari R, Dybus A, Purcell M, Vučković A. Motor priming to enhance the effect of physical therapy in people with spinal cord

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.

INVESTIGACIÓN en DISCAPACIDAD
Vol. 12, 2026 pp e54-e63

injury. Journal of Spinal Cord Medicine. Taylor and Francis Ltd.; 2025;48:312–26. https://doi.org/10.1080/10790268.2024.2317011
31. Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. Clin Neurophysiol. Netherlands; 1999;110:1842–57. https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00141-8
32. Pfurtscheller G, Brunner C, Schlögl A, Lopes da Silva FH. Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. Neuroimage. United States; 2006;31:153–9. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.12.003
33. López-Larraz E, Escolano C, Montesano L, Minguez J. Reactivating the Dormant Motor Cortex After Spinal Cord Injury With EEG Neurofeedback: A Case Study With a Chronic, Complete C4 Patient. Clin EEG Neurosci. SAGE Publications Inc.; 2019;50:100–10. https://doi.org/10.1177/1550059418792153
34. Nicoll RA. A Brief History of Long-Term Potentiation. Neuron. United States; 2017;93:281–90. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.12.015
35. Alawieh H, Liu D, Madera J, Kumar S, Racz FS, Fey AM, et al. Electrical spinal cord stimulation promotes focal sensorimotor activation that accelerates brain–computer interface skill learning. Proceedings of the National Academy of Sciences [Internet]. Proceedings of the National Academy of Sciences; 2025;122:e2418920122. https://doi.org/10.1073/pnas.2418920122
36. Hernandez-Rojas LG, Cantillo-Negrete J, Mendoza-Montoya O, Carino-Escobar RI, Leyva-Martinez I, Aguirre-Guemez A V., et al. Brain-Computer Interface Controlled Functional Electrical Stimulation: Evaluation With Healthy Subjects and Spinal Cord Injury Patients. IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2022;10:46834–52. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3170906
37. Vŭckovíc A, Wallace L, Allan DB. Hybrid brain-Computer interface and functional electrical stimulation for sensorimotor training in participants with tetraplegia: A Proof-of-Concept Study. Journal of Neurologic Physical Therapy. Lippincott Williams and Wilkins; 2015;39:3–14. https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000063
38. Gant K, Guerra S, Zimmerman L, Parks BA, Prins NW, Prasad A. EEG-controlled functional electrical stimulation for hand opening and closing in chronic complete cervical spinal cord injury. Biomed Phys Eng Express. Institute of Physics Publishing; 2018;4. https://doi.org/10.1088/2057-1976/aabb13
39. Baillet S. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging. Nat Neurosci [Internet]. 2017;20:327–39. https://doi.org/10.1038/nn.4504
40. Foldes ST, Boninger ML, Weber DJ, Collinger JL. Effects of MEG-based neurofeedback for hand rehabilitation after tetraplegia: Preliminary findings in cortical modulations and grip strength. J Neural Eng. Institute of Physics Publishing; 2020;17. https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab7cfb
41. Foldes ST, Weber DJ, Collinger JL. MEG-based neurofeedback for hand rehabilitation. J Neuroeng Rehabil. BioMed Central Ltd.; 2015;12. https://doi.org/10.1186/s12984-015-0076-7
42. Schildt CJ, Thomas SH, Powell ES, Sawaki L, Sunderam S. Closed-loop afferent electrical stimulation for recovery of hand function in individuals with motor incomplete spinal injury: Early clinical results. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). 2016. p. 1552–5. https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591007
43. Zulauf-Czaja A, Al-Taleb MKH, Purcell M, Petric-Gray N, Cloughley J, Vuckovic A. On the way home: a BCI-FES hand therapy self-managed by sub-acute SCI participants and their caregivers: a usability study. J Neuroeng Rehabil. BioMed Central Ltd; 2021;18. https://doi.org/10.1186/s12984-021-00838-y
44. McGeady C, Vučković A, Singh Tharu N, Zheng YP, Alam M. Brain-Computer Interface Priming for Cervical Transcutaneous Spinal Cord Stimulation Therapy: An Exploratory Case Study. Frontiers in Rehabilitation Sciences. Frontiers Media SA; 2022;3. https://doi.org/10.3389/fresc.2022.896766
45. Petersen JA, Wilm BJ, Von Meyenburg J, Schubert M, Seifert B, Najafi Y, et al. Chronic cervical spinal cord injury: DTI correlates with clinical and electrophysiological measures. J Neurotrauma. 2012;29:1556–66. https://doi.org/10.1089/neu.2011.2027
46. Jurkiewicz MT, Mikulis DJ, McIlroy WE, Fehlings MG, Verrier MC. Sensorimotor cortical plasticity during recovery following spinal cord injury: A longitudinal fMRI study. Neurorehabil Neural Repair. 2007;21:527–38. https://doi.org/10.1177/1545968307301872

© Instituto Nacional de Rehabilitación Luis Guillermo Ibarra Ibarra under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license which allows to reproduce and modify the content if appropiate recognition to the original source is given.