

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ
FACULTAD DE MEDICINA
TRABAJO FIN DE GRADO EN FISIOTERAPIA



Diferencias entre modalidades sensoriales de *feedback* (visual, auditivo y propioceptivo) durante el entrenamiento de la Imaginería Motora con un sistema BCI.

AUTOR: REQUENA PÉREZ, NURIA

Nº Expediente:1132

TUTOR: Eduardo Fernández Jover.

COTUTORES: Juan Antonio Barrios Heredero y Nicolás García Aracil.

Departamento de Patología y Cirugía. Área de Fisioterapia.

Curso académico 2016 – 2017.

Convocatoria de Junio.

“Si puedes imaginarlo, puedes alcanzarlo; si puedes soñarlo, puedes hacerlo.”

-William Arthur Ward-



ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1.INTRODUCCIÓN	3
2.HIPÓTESIS DE TRABAJO	5
3.OBJETIVOS	5
3.1. OBJETIVO PRINCIPAL	5
3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS	6
4.MATERIAL Y MÉTODOS	6
4.1. TIPO DE ESTUDIO, ÁMBITO, PERÍODO, LUGAR Y PERSONAL DE ESTUDIO	6
4.2. CRITERIOS DE INCLUSIÓN	7
4.3. CRITERIOS DE EXCLUSIÓN	7
4.4. MUESTRA	7
4.5. INTERVENCIÓN	7
4.5.1. SESIÓN PREVIA AL ENTRENAMIENTO: CONCIENCIACIÓN Y MEDITACIÓN ...	8
4.5.2. COLOCACIÓN DEL GORRO Y LOS ELECTRODOS. INTERNATIONAL SYSTEM 10-20	9
4.5.3. BCI2000	9
4.5.4. EXOESQUELETO DE MANO DERECHA	9
4.6. RECOGIDA DE DATOS ESTADÍSTICOS	10
4.6.1ANÁLISIS DE LAS SEÑALES EEG CON EEGLAB	10
4.6.2. DATOS CUALITATIVOS	10
4.6.3. DATOS CUANTITATIVOS	11
5.RESULTADOS	12
5.1. ESTUDIO DE LAS SEÑALES EEG CON EEGLAB	12
5.2. RESULTADOS CUALITATIVOS	13
5.3. RESULTADOS CUANTITATIVOS	14
6.DISCUSIÓN	15
7.CONCLUSIONES	16
ANEXOS	17
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

RESUMEN

Introducción: La Imaginería Motora (IM) consiste en la evocación mental de un movimiento sin realizarlo activamente. Durante la IM se activa la corteza motora primaria de una manera similar a cuando se realiza un movimiento activo. Los BCI (Brain-Computer Interface) son unos sistemas basados en la adquisición de actividad cerebral, la cual es traducida a comandos informáticos y utilizada para controlar un dispositivo externo. En este estudio, se lleva a cabo un entrenamiento basado en IM con el objetivo de controlar un exoesqueleto.

Objetivos: Describir las diferencias entre tres modalidades sensoriales de *feedback* (visual, auditivo o propioceptivo) durante el entrenamiento de la IM, empleando BCI, para el control de un exoesqueleto.

Material y método: Se lleva a cabo un entrenamiento de cinco sesiones en diez sujetos sanos. Durante las sesiones, se les pide a los sujetos que realicen tareas de imaginar el movimiento de apertura y cierre de la mano. Durante las dos últimas sesiones se incorpora un exoesqueleto. La actividad cerebral es recogida en electroencefalogramas que posteriormente son analizados.

Resultados: La modalidad sensorial propioceptiva favorece significativamente el aprendizaje en tareas de IM para controlar un exoesqueleto de mano.

Conclusiones: Es importante incluir, entre los objetivos del tratamiento fisioterápico, la mejora de la propiocepción, ya que es importante producir estímulos propioceptivos que favorezcan una reorganización cerebral funcional.

Palabras clave: BCI, EEG, Imaginería Motora, rehabilitación motora.

ABSTRACT

Introduction: Motor Imagery (MI) consists in the mental evocation of a movement without making it actively. During the MI, the primary motor cortex is activated on a similar way that when an active movement is made. BCI (Brain-Computer Interface) systems are based on the acquisition of cerebral activity, which is translated to computer commands and used to control an external mechanism. In the following study, a training based in MI is carried out to control an exoskeleton.

Objectives: Describe the differences between three sensorial modalities of visual, auditory or proprioceptive feedback during the MI training, by using BCI to an exoskeleton control.

Material and method: A five sessions training is carried out on ten healthy subjects. During the sessions, the subjects are asked to complete the task of imagining the opening and closing hand movement. During the two last sessions, an exoskeleton is added to the training. The cerebral activity is registered in electroencephalograms in which they are subsequently analysed.

Results: The proprioceptive sensorial modality significantly favours the learning on IM tasks to control a hand exoskeleton.

Conclusions: It is important to include the proprioception improvement between the aims of the physiotherapy treatment, due to its importance to produce proprioceptive encouragement which favour a functional cerebral reorganization.

Key words: *BCI, EEG, Motor Imagery, motor rehabilitation.*

1. INTRODUCCIÓN

El término “Imaginería Motora” (IM) consiste en la evocación mental de un gesto o movimiento por parte de un sujeto, sin realizarlo activamente, con el objetivo de aprender o mejorar su ejecución. Hace referencia a la percepción de una acción motora sin su ejecución, gracias a la forma en que el cerebro percibe y recuerda la información que recibe. Es pues, un hecho muy subjetivo, pues no fue medible hasta el advenimiento de las técnicas de imagen cerebral funcional. La expresión IM es un neologismo coloquialmente aceptado por la comunidad científica de habla hispana, dado que proviene de la traducción literal del inglés “Motor Imagery”. Existen diversas denominaciones y definiciones para el mismo concepto, como “Entrenamiento Mental” o “Imaginación Mental del Movimiento” (García Carrasco D et al, 2016; Guillot A et al, 2008; Zimmermann-Schlatter A et al, 2008; Tamayo Martínez N, 2014).

Durante el proceso de IM, se ha hallado una activación de la corteza motora primaria (M1) y las cortezas motoras suplementarias. Y es que las neuronas de la corteza M1 tienen la capacidad de dissociarse del movimiento, e incluso de la activación de los músculos, cuando éstas ya se han activado. Este hecho dota de base científica suficiente para el desarrollo de un entrenamiento mental del movimiento, pues esta dissociabilidad de las neuronas de M1 son la base para que un sujeto pueda controlar un sistema BCI (Brain-Computer Interface) (Schieber M, 2011).

Los Sistemas BCI son tecnologías basadas en la adquisición de actividad cerebral (AC), a la cual se le atribuye una función en forma de comandos informáticos y, posteriormente, se utiliza para controlar un dispositivo externo, como un exoesqueleto, creando así un nuevo canal de comunicación entre cerebro, ordenador y medio ambiente (Figura 1: Funcionamiento básico de un sistema BCI) (Alarid Escudero F et al, 2008; Muñoz H et al, 2014).

Estos sistemas dependen de la capacidad del sujeto para controlar su AC. Los cambios en la AC pueden evaluarse por medio de la electroencefalografía (EEG). Esta técnica mide la actividad eléctrica cerebral usando electrodos adheridos al cuero cabelludo, que son activados por el flujo de corrientes eléctricas durante excitaciones sinápticas de las dendritas en las neuronas. La señal de EEG se mide

como la diferencia de potencial a lo largo del tiempo entre la señal (o electrodo activo) y el electrodo de referencia. Un tercer electrodo, llamado electrodo de tierra, se emplea para reducir el ruido en la medición. De la AC detectada se obtienen los ritmos cerebrales que componen el EEG (Muñoz H et al, 2014; Ferreira Lage, 2009; Gómez Pilar J, 2015).

En este trabajo, se utilizará un sistema BCI basado en los cambios en los ritmos sensoriomotores (RSM) que ocurren durante el ensayo mental del movimiento de la mano derecha. Este tipo de BCI requiere de un periodo de entrenamiento, con el fin de que los sujetos posean cierto control sobre sus señales EEG. Durante el entrenamiento es importante proporcionar al sujeto algún tipo de *feedback* que le permita conocer su evolución. Cabe destacar también que dentro de la investigación en sistemas BCI existe un problema llamado “Analfabetismo BCI” el cual se basa en que existe un porcentaje de sujetos (15-30%) que no consigue controlar su AC después de un entrenamiento (Gómez Pilar J, 2015; Vidaurre C et al, 2010; Zich C et al, 2015).

Con este BCI se estudiarán las variaciones de la amplitud de los ritmos α (8-12 Hz) y β (13-30 Hz), que se registran sobre la zona somatosensorial y motora de la corteza cerebral. La amplitud del EEG disminuye durante el movimiento real o imaginado y aumenta durante los estados de relajación. Dado que estos ritmos presentan variaciones tanto para la ejecución de un movimiento real como para la imaginación del mismo, los utilizaremos para permitir al sujeto controlar un exoesqueleto de la mano derecha únicamente imaginando el movimiento de ésta (Palau-Baduell M et al, 2011; Muñoz H et al, 2014; Rupp R, 2014).

Todo lo anterior tiene una clara aplicación fisioterápica: crear nuevos métodos de tratamiento y rehabilitación para personas con daño neuronal, siempre que tengan capacidad para imaginar. Por lo que no deberían presentar lesiones parietales, ni de M1, ni prefrontales laterales izquierdas o derechas, debido a que el córtex parietal es imprescindible para generar representaciones mentales del movimiento. Uno de los mayores campos de intervención de BCI es en el Accidente Cerebro Vascular (ACV), pero para ellos también existe un criterio de exclusión: que la zona afectada sea M1, bien por

lesión de la arteria cerebral media (ACM) o por hipertensión intracraneal tras el vertido sanguíneo de otra arteria lesionada.

Cabe estudiar el caso de una afectación de la ACM, ya que se cuenta con la arteria cerebral anterior (ACA), cuyas ramas también irrigan a M1. Además, en el caso de afectación de M1, habría que conocer el estado de la corteza somatomotora secundaria, que podría suplir parte de su labor gracias a la neuroplasticidad. Según esto, un buen candidato a BCI sería aquel que no tenga lesión en la corteza somatomotora primaria, y que la lesión esté en las vías de conexión corticotalámicas o a nivel inferior en sentido eferente.

Con el presente estudio, se pretende llevar a cabo un entrenamiento basado en IM destinado a sujetos sanos, con el objetivo de controlar un exoesqueleto de la mano derecha, e investigar qué tipo de *feedback* (visual, auditiva o propioceptiva) es más efectiva o útil para dichos sujetos durante la presentación de un estímulo para que imaginen un movimiento.

2. HIPÓTESIS DE TRABAJO

La AC provocada por los estímulos elaborados por un sistema BCI en respuesta a una tarea de IM depende de la modalidad sensorial (visual, auditiva o propioceptiva) utilizada.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

- Describir las diferencias entre las tres modalidades sensoriales de *feedback* (visual, auditivo o propioceptivo) durante el entrenamiento de tareas en sujetos sanos, empleando BCI, al pedirles que controlen la apertura y cierre de un exoesqueleto de la mano derecha mediante IM.

3.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Elaborar un protocolo optimizado para el entrenamiento de IM y el control de un exoesqueleto de mano derecha.
- Conocer si existe aprendizaje en los sujetos tras un entrenamiento con las distintas modalidades sensoriales de *feedback*.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. TIPO DE ESTUDIO, ÁMBITO, PERÍODO, LUGAR Y PERSONAL DE ESTUDIO

Se trata de un estudio controlado experimental con sujetos sanos, 5 mujeres y 5 hombres, de entre 21 y 32 años; realizado a lo largo de seis semanas, en abril y mayo de 2017, de lunes a viernes, en el laboratorio de sistemas inteligentes del Edificio Quorum V, en la Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante.

El lugar donde se llevó a cabo fue una sala pequeña y controlada, con una mesa, dos sillas, un ordenador, desde el cual se dirigen las tareas y se recogen los datos, y una pantalla externa, desde la cual el sujeto observa los estímulos y respuestas.

En este estudio se recoge la AC de un grupo de sujetos sanos que han sido sometidos a un entrenamiento de la IM durante 5 sesiones en 5 días distintos. En cada sesión se introducen una serie de tareas presentadas por el sistema BCI2000, en las que se muestran estímulos y respuestas con el fin de impulsar o disminuir la AC de los sujetos.

Este entrenamiento ha sido ampliamente desarrollado en el trabajo de Grado “Modulación del ritmo sensoriomotor durante un entrenamiento con Imaginería Motora a través de un sistema BCI”, de Luisa Lorente Lorenzo, realizado simultáneamente a éste, y cuyo objetivo es evaluar los cambios en la AC a lo largo de las 5 sesiones de entrenamiento con BCI. Por lo tanto, los sujetos participantes en este estudio ya tenían experiencia previa en IM y BCI, y mostraron signos de aprendizaje.

Durante las dos últimas sesiones, en cuales se centra este estudio, se incorporan tareas similares a las anteriores, pero empleando un exoesqueleto de mano.

4.2. CRITERIOS DE INCLUSIÓN

Serán partícipes del estudio sujetos adultos sanos, de ambos sexos y con pleno nivel cognitivo para comprender las tareas y llevarlas a cabo.

También se requiere que dichos sujetos sean diestros, pues el exoesqueleto del que se disponía solo se podía emplear en la mano derecha.

4.3. CRITERIOS DE EXCLUSIÓN

Pacientes zurdos y con cualquier alteración de comprensión que les impida entender las tareas que se requieren.

4.4. MUESTRA

Como procedimiento de selección de sujetos voluntarios se lanza un mensaje a través de redes sociales en el que se explica brevemente el desarrollo del trabajo, la ubicación en la que se lleva a cabo y el tiempo necesario para su realización. Inicialmente, se captaron un total de 12 sujetos voluntarios, de los cuales 10 finalizan el entrenamiento.

4.5. INTERVENCIÓN

La intervención fue llevada a cabo por dos estudiantes de Fisioterapia, que tienen capacidad y conocimiento suficiente sobre IM, EEG y BCI2000 para su realización.

Todos los sujetos son incluidos en un protocolo de entrenamiento (Anexo 1: Descripción del protocolo de entrenamiento) para aprender a manejar un exoesqueleto de la mano derecha a partir de la activación de M1 mediante IM, que es explicado minuciosamente por las investigadoras y aceptado por los sujetos.

Los sujetos son citados para las 5 sesiones en el lugar de intervención en días y horas elegidos a conveniencia por ellos mismos.

En la cuarta y quinta sesión (S4 y S5), se repite la última tarea tres veces y es idéntica con respecto a los estímulos lanzados por el BCI (IMAGINE/CLOSE), pero la respuesta del sistema es distinta:

- Visual (T4): Aparece media circunferencia amarilla, que se cierra al detectar cambios en la AC.
- Auditiva (T5a): El exoesqueleto está conectado al BCI, pero está tapado con una caja, por lo que se escucha un sonido robótico cuando se detectan cambios en la AC.
- Propioceptiva (T5b): El exoesqueleto está colocado en la mano derecha del sujeto, que se le pide que relaje la mano. Si la tarea se realiza correctamente, el exoesqueleto cierra y abre la mano del sujeto.

El orden en el que se realizaron estas tres tareas fue completamente aleatorio entre sujetos y entre sesiones. Al final de la sesión, y por curiosidad, se pregunta al sujeto sobre cuál de los tres tipos de *feedback* le ha resultado de más ayuda durante la tarea.

4.5.1. SESIÓN PREVIA AL ENTRENAMIENTO: CONCIENCIACIÓN Y MEDITACIÓN

Durante la primera y tercera sesión de cada sujeto, se realiza, una sesión, de 10 minutos, en una habitación distinta, sobre meditación, propiocepción, y percepción del concepto de IM, con el objetivo de que el sujeto entre en un estado de relajación, concienciación y concentración, y esté preparado para desarrollar las tareas que se pedirán posteriormente (Anexo 2: Guion para la sesión de meditación previa a BCI). Durante esta sesión, el sujeto se encuentra en sedestación y con los ojos cerrados. Comienza concentrándose en su respiración hasta conseguir que ésta sea lenta y calmada. Tras ello, se pide al sujeto que abra y cierre la mano derecha unas 15 veces, concentrándose y sintiendo el movimiento. Después el sujeto imagina el movimiento que ha realizado, haciendo hincapié en que, a pesar de no mover la mano, la sensación de movimiento mientras lo imagina debe ser equiparable a cuando lo ejecuta activamente. Al finalizar el sujeto regresa la sala del entrenamiento.

4.5.2. COLOCACIÓN DEL GORRO Y LOS ELECTRODOS. *INTERNATIONAL SYSTEM 10-20*.

La colocación de los electrodos sobre el cuero cabelludo al realizar un EEG está sujeta al *International System 10-20* (Figura 2: Colocación de electrodos según el Sistema 10-20), basado en la relación entre la ubicación de un electrodo y el área subyacente de la corteza cerebral. Los electrodos están espaciados entre el 10% y el 20% de la distancia total entre puntos reconocibles del cráneo, a partir de los cuales se realizan las medidas (Hasper H, 1958; Klem G et al, 1999).

Para este estudio, se emplea un gorro de neopreno que lleva incorporados 19 ubicaciones para electrodos (Figura 3: Casco de neopreno empleado durante el estudio) y se utilizan las ubicaciones: F3, CZ, C3, T3 (o T7), P3, FPZ y C4. Se emplea una jeringa y una aguja con punta roma para introducir en cada uno de estos espacios un gel conductor líquido y otro sólido para facilitar la recepción de la señal a través del cuero cabelludo y reducir la impedancia entre éste y el electrodo. Los electrodos se unen en un conector y éste, a su vez, conecta con un Control Box, que recoge la actividad eléctrica de cada electrodo y la envía vía Bluetooth a un ordenador, donde el sistema BCI2000 la transcribe (Figura 4: Material empleado durante el estudio).

4.5.3. BCI2000

El programa BCI2000 es un sistema de software desarrollado y distribuido libremente, disponible de forma gratuita [<http://www.schalklab.org/research/bci2000>], creado con el propósito de facilitar la investigación y docencia en sistemas BCI, sin fines de lucro. Es útil para la adquisición de datos, presentación de estímulos y aplicaciones de monitorización cerebral en tiempo real.

4.5.4. EXOESQUELETO DE MANO DERECHA

El exoesqueleto utilizado durante el estudio ha sido desarrollado por el Grupo de Investigación Biomédica de Neuroingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

El dispositivo en cuestión es un robot tipo exoesqueleto con tres grados de libertad (Figura 5: Exoesqueleto de mano), que puede actuar de forma independiente sobre los dedos índice, corazón y el grupo anular-meñique. El movimiento de los dedos se controla por un mecanismo de barras que acopla las rotaciones de las falanges proximal y medial. Adicionalmente, el dispositivo permite fijar la posición del dedo pulgar mediante un mecanismo de barras regulable con opción a bloqueo. Este mecanismo se fija a las falanges proximales y mediales de cada dedo mediante unos anillos elásticos que se insertan por presión en el mecanismo. A su vez, la mano se fija al bastidor del dispositivo mediante una ortesis ajustable mediante correas.

4.6. RECOGIDA DE DATOS ESTADÍSTICOS

Para la obtención de datos, se utilizan los EEGs registrados durante T4, T5a y T5b durante S4 y S5, en los que se obtienen la AC durante los estímulos presentados (IMAGINE/RELAX).

4.6.1. ANÁLISIS DE LAS SEÑALES EEG CON EEGLAB

Se emplea la herramienta EEGLAB, incluida en las funciones del programa Matlab para el procesamiento y visualización de los datos EEG obtenidos. Se hace un remuestreo a 128 Hz. Se emplea la función *RunICA* para eliminar canales de datos, épocas y componentes dominados por artefactos no neurales, como las señales visuales. Después, se realiza un filtrado paso banda entre 0.5-48 Hz (Delorme A et al, 2004).

4.6.2. DATOS CUALITATIVOS

Cualitativamente, se considerará que existe aprendizaje en una tarea cuando se pueden observar diferencias, a simple vista, entre la representación del RSM cuando aparece el estímulo IMAGINE (línea azul) y la representación del RSM cuando aparece el estímulo RELAX (línea roja) en un EEG. La Tabla 1: Comparativa de ejemplo entre un sujeto que aprende y uno que no aprende, muestra las curvas en las representaciones del RSM en un sujeto que ha aprendido y en otro sujeto que no, al finalizar el entrenamiento.

Para la obtención de datos cualitativos sobre cuál de las tres tareas favorece el aprendizaje, se realiza una clasificación de los EEG. Se asigna un valor de 0 a 2 a cada EEG, dependiendo de si las diferencias observables a simple vista entre los estímulos IMAGINE/RELAX son: claramente diferentes (puntuación 2), parcialmente diferentes (puntuación 1) o no hay diferencias entre ellas (puntuación 0). Una vez clasificados los EEG, se realiza la media de los valores de T4S4, T5aS4, T5bS4, T4S5, T5aS5 y T5bS5 de todos los sujetos (Tabla 2: Resultados Cualitativos).

Para establecer si dentro del mismo sujeto existe aprendizaje tras S4 y S5, se suman las puntuaciones (Columna “¿Aprendizaje?” de Tabla 2: Resultados Cualitativos) obtenidas en las seis tareas estudiadas y se establece un Índice, en el cual la puntuación máxima sería 12 (en todas las tareas existen diferencias) y la puntuación mínima sería 0 (no existen diferencias en ninguna de las tareas). Si el sujeto obtiene una puntuación mayor o igual a 6, se considera que ha aprendido a diferenciar entre los estímulos IMAGINE/RELAX.

4.6.3. DATOS CUANTITATIVOS

Cuantitativamente, se reconoce que existe aprendizaje en los sujetos cuando se hallan modificaciones de una conducta observada ante los mismos estímulos a lo largo de las sesiones. En este caso, se mide la pendiente de las curvas de la AC obtenida durante los estímulos, señalando cuatro puntos de dichas curvas (Figura 6: Obtención de puntos de las curvas):

- R1: punto máximo local al inicio del estímulo RELAX.
- A1: punto máximo local al inicio del estímulo CLOSE.
- R2: punto mínimo local al final del estímulo RELAX.
- A2: punto mínimo local al final del estímulo CLOSE.

Se crea una tabla donde se reflejan los números que representan dichos puntos en el eje Y (Tabla 3: Valores R1, A1, R2, A2 en el eje Y).

Para los cálculos estadísticos, se empleó el programa de software libre R. Como variable dependiente, utilizamos el valor R (R2-R1), que representa la pendiente de la amplitud del EEG durante el estímulo RELAX; como variable independiente, tiempo (S4 y S5).

Primero, se realiza un Test de Anova, que demuestra que las medias entre las tareas son diferentes. Después, se hace un Test de medias múltiples para comprobar en qué días y modalidad de estímulo se encuentran diferencias significativas y se realiza un diagrama de cajas en el que se representan las medias de S4 y S5 de las tres tareas estudiadas (Figura 7: EEG según modalidades de estímulo en una tarea BCI).

5. RESULTADOS

5.1. ESTUDIO DE LAS SEÑALES EEG CON EEGLAB

En el análisis de las señales EEG con EEGLAB (Figura 8: Análisis de las señales EEG con EEGLAB) se contemplan claras disminuciones, tanto de la potencia como de la amplitud del EEG en la banda 8-12 Hz cuando se realiza un movimiento activo (o lo que es igual, desincronización del RSM), lo que nos sirve para comparar con la realización de un movimiento mental con diferentes modalidades sensoriales como *feedback* (Figura 8.A. Comparativa movimiento activo VS. IM con *feedback* visual.).

Cuando la realimentación se realiza con modalidad sensorial visual, la potencia y la amplitud de la señal disminuyen en el tiempo que ocupa el estímulo IMAGINE, lo cual significa que hay cambios en la AC similares a cuando se realiza el movimiento de forma activa.

Durante el estímulo RELAX la potencia y la amplitud de la señal no se modifican, como es de esperar, de hecho, hay mayor potencia durante este estímulo en la tarea de imaginar un movimiento que en la tarea de realizar el movimiento activamente, lo que indica que los sujetos consiguen cambiar su AC entre estímulos.

Además, en las imágenes que representan el p-valor se observa un nivel de significación alto (p muy baja), tanto al comparar el movimiento activo con el imaginado, como al comparar el estímulo IMAGINE con el RELAX.

Los resultados más notables ocurren cuando se incorpora el exoesqueleto al entrenamiento. Con la modalidad sensorial auditiva, el ritmo SMR se desincroniza hasta niveles muy semejantes a cuando se realiza un movimiento activamente. Sin embargo, esta desincronización dura menos tiempo.

Con la modalidad propioceptiva, la potencia y la amplitud de la señal prácticamente se iguala a cuando se realiza un movimiento activo, y, significativamente, incluso dura más tiempo.

Con respecto al estímulo RELAX, la amplitud y la potencia no se modifican con respecto a condiciones basales, y no hay diferencias significativas entre las modalidades auditiva y propioceptiva.

En la Figura 8.B. Comparativa IM con *feedback* propioceptivo VS. IM con *feedback* auditivo, se observan diferencias muy significativas entre los estímulos IMAGINE y RELAX en la tarea con modalidad propioceptiva. Se observa un marcado incremento de la duración de la desincronización del RSM, que excede incluso el final de la tarea, de forma similar (aunque en este último de forma menos acentuada) a la tarea en la que se realiza el movimiento activo. Los niveles de significación de las tareas con modalidad visual y auditiva son muy similares entre ellos, y los cambios descritos son menos marcados que en las tareas con componente propioceptivo.

5.2. RESULTADOS CUALITATIVOS

Tras el análisis de los valores obtenidos en la Tabla 2: Resultados Cualitativos, se observa que en T5b, durante S4, existe mejoría en el aprendizaje de los sujetos (la puntuación media es +1'6), pues consiguen diferenciar más entre las tareas IMAGINE y CLOSE, que en las tareas T4 y T5a (la puntuación media es +1'1 y +1, respectivamente).

Sin embargo, durante S5, se observa que el aprendizaje en T4 ha aumentado con respecto a la sesión anterior (la puntuación media es +1'4), mientras que el aprendizaje en T5a y T5b se mantiene (la puntuación media es +1 y +1'5, respectivamente), lo cual puede significar que el aprendizaje adquirido durante T5bS4 favorece el aprendizaje en T4S5.

Aplicando el Índice para establecer si existe aprendizaje en cada sujeto, se observa que hay 8 sujetos que obtienen una puntuación igual o superior a 6, por lo que se considera que existe aprendizaje. También se observa que dos sujetos han obtenido una puntuación inferior a 6, por lo que se considera que no han aprendido a diferenciar entre los estímulos mostrados.

Con respecto a la percepción de cada sujeto (datos que fueron recogidos por simple curiosidad, no se marcaron como objetivo), 4/10 sujetos creen que el *feedback* propioceptivo es el que más les ayuda durante S4 y S5. También, 2/10 sujetos piensa que el *feedback* visual les resulta más útil, ya sea porque ha sido el más utilizado durante todo el entrenamiento o porque el ruido del exoesqueleto no les permite concentrarse del todo. Hay 4/10 sujetos que eligen distintos *feedbacks* entre S4 y S5, estos sujetos coinciden en que, en primer lugar, realizan la tarea con *feedback* propioceptivo, y después con el visual. Además, ellos mismos reflejan que el orden en el que se han presentado les ha influido.

5.3. RESULTADOS CUANTITATIVOS

El Test de Anova demostró que existen diferencias significativas entre las medias ($P=0,002$). Se representan los valores R en un diagrama de cajas (Figura 7: EEG según modalidades de estímulo en una tarea BCI), en el que se observa que, tras S4, la mejora en el aprendizaje en T5b es significativamente mayor que en las otras tareas de S4. Sin embargo, tras las mismas tareas en la sesión 5, se observa que T4 y T5a han mejorado notablemente con respecto a la sesión anterior, igualando en aprendizaje a T5b. Lo cual puede indicar que el aprendizaje conseguido tras T5bS4 favorece el aprendizaje en T4S5 y T5aS5. El aprendizaje en T5bS5 se mantiene similar a T5bS4 ya que en S4 se alcanza el máximo aprendizaje.

6. DISCUSIÓN

En el presente estudio, se han evaluado las distintas respuestas en la AC ante distintas modalidades sensoriales durante un entrenamiento realizado por medio de un sistema BCI basado en IM. El análisis se centró en la evaluación del aprendizaje de los sujetos y en su capacidad de controlar un exoesqueleto de mano durante dicho ejercicio usando diferentes modalidades sensoriales como *feedback*.

Con respecto al entrenamiento de la IM con BCI, nuestros hallazgos son compatibles con lo descrito en la literatura científica (Vidaurre C et al, 2010; Zich C et al, 2015), pues en este estudio se encontraron un 20% de sujetos que no consiguieron aprender tras el entrenamiento con BCI, lo cual está dentro de la media (15-30%).

Nuestro principal resultado puede resumirse en que la modalidad sensorial propioceptiva favorece, de forma significativa, el aprendizaje en tareas de IM para controlar un exoesqueleto de mano.

Este hecho hace remarcar la importancia de incluir la mejora de la propiocepción en los objetivos del tratamiento fisioterápico. La propiocepción, según Sherrington (1906), es “la información sensorial que contribuye al sentido de la posición propia y al movimiento”. Esta información es importante, especialmente, en movimientos comunes de actividades que se realizan a diario, y se puede perder parcialmente en patologías neurológicas como el ACV. Tras una lesión de este tipo, el sistema motor intenta adaptarse continuamente para lograr y mantener el rendimiento óptimo del funcionamiento motor (neuroplasticidad).

El movimiento del exoesqueleto produce un estímulo en la mano del sujeto, que es procesado por los circuitos neuronales, y es capaz de modular la actividad cerebral del sujeto que, al mismo tiempo, está imaginando el movimiento. Por lo que es posible que su uso pueda favorecer una reorganización cerebral funcional motivada por la asociación simultánea entre la activación cerebral, durante la imaginación de un movimiento, y la estimulación propioceptiva del exoesqueleto, que podría ser útil

en tareas de rehabilitación motora, como, por ejemplo, en rehabilitación de ACV (Soekadar S et al, 2015).

El presente estudio posee algunas limitaciones. En primer lugar, sería deseable aumentar la población de estudio, con el fin de que los resultados sean más robustos y generalizables. Además, un seguimiento de los sujetos entrenados podría proporcionar información sobre el mantenimiento a largo plazo del aprendizaje adquirido.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio, aunque es preliminar, muestra resultados prometedores acerca del uso de distintas modalidades sensoriales en un sistema BCI para realizar IM con el fin de controlar un exoesqueleto de mano. Estos resultados pueden tener implicaciones importantes en el desarrollo y diseño de nuevas técnicas de rehabilitación destinadas a la restauración de la función cerebral utilizando BCI.

El trabajo realizado sugiere que la hipótesis de que la AC provocada por los estímulos elaborados por un sistema BCI depende de la modalidad sensorial (visual, auditiva o propioceptiva) utilizada.

ANEXO DE FIGURAS

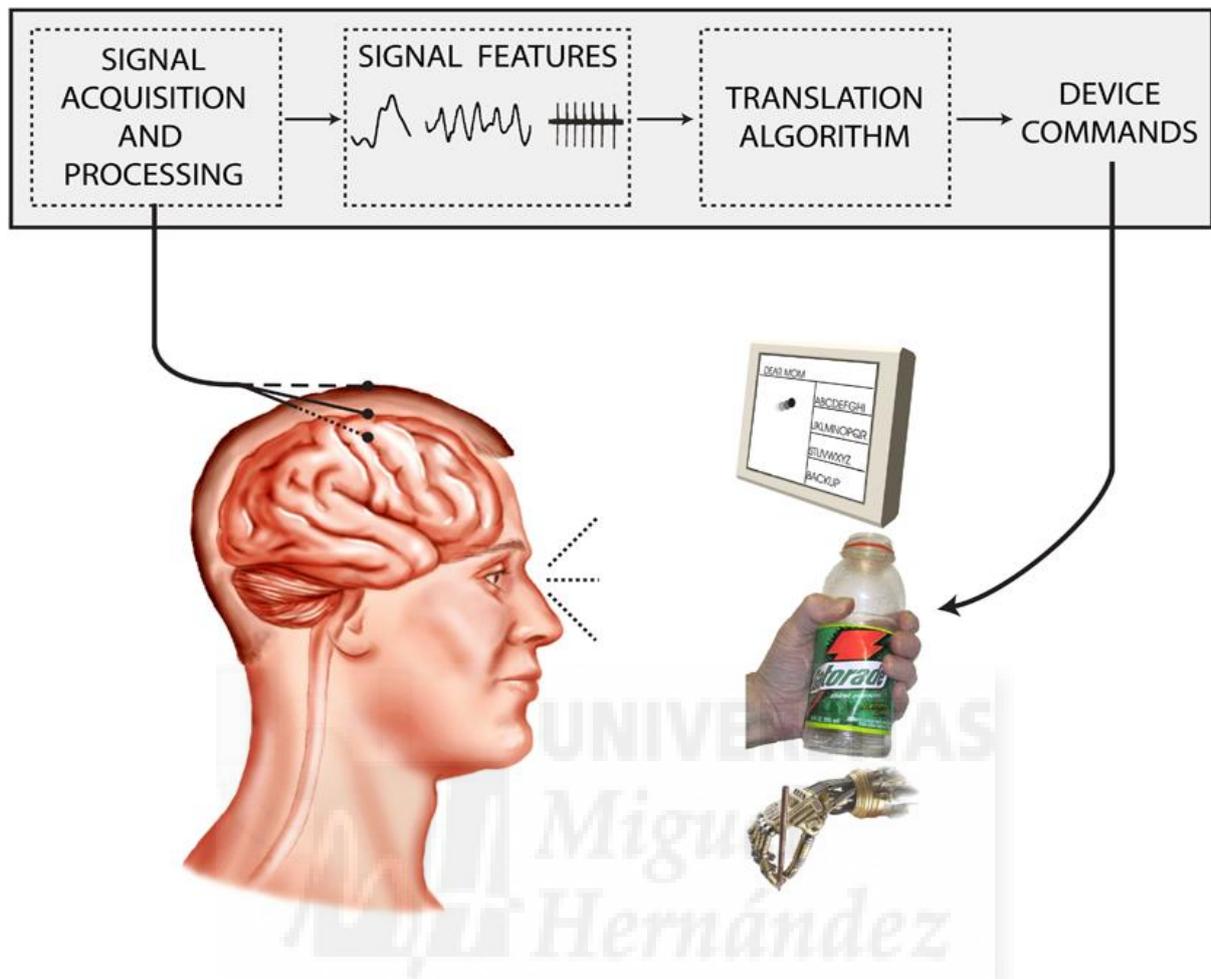


Figura 1. Funcionamiento básico de un sistema BCI. Los ritmos cerebrales son adquiridos por electrodos en el cuero cabelludo y procesadas para extraer las características, que son traducidos a comandos informáticos. Estos comandos se utilizan posteriormente para controlar un dispositivo externo. Imagen tomada del libro “A Practical Guide to Brain-Computer Interfacing with BCI2000” de Gerwin Schalk y Jürgen Mellinger.

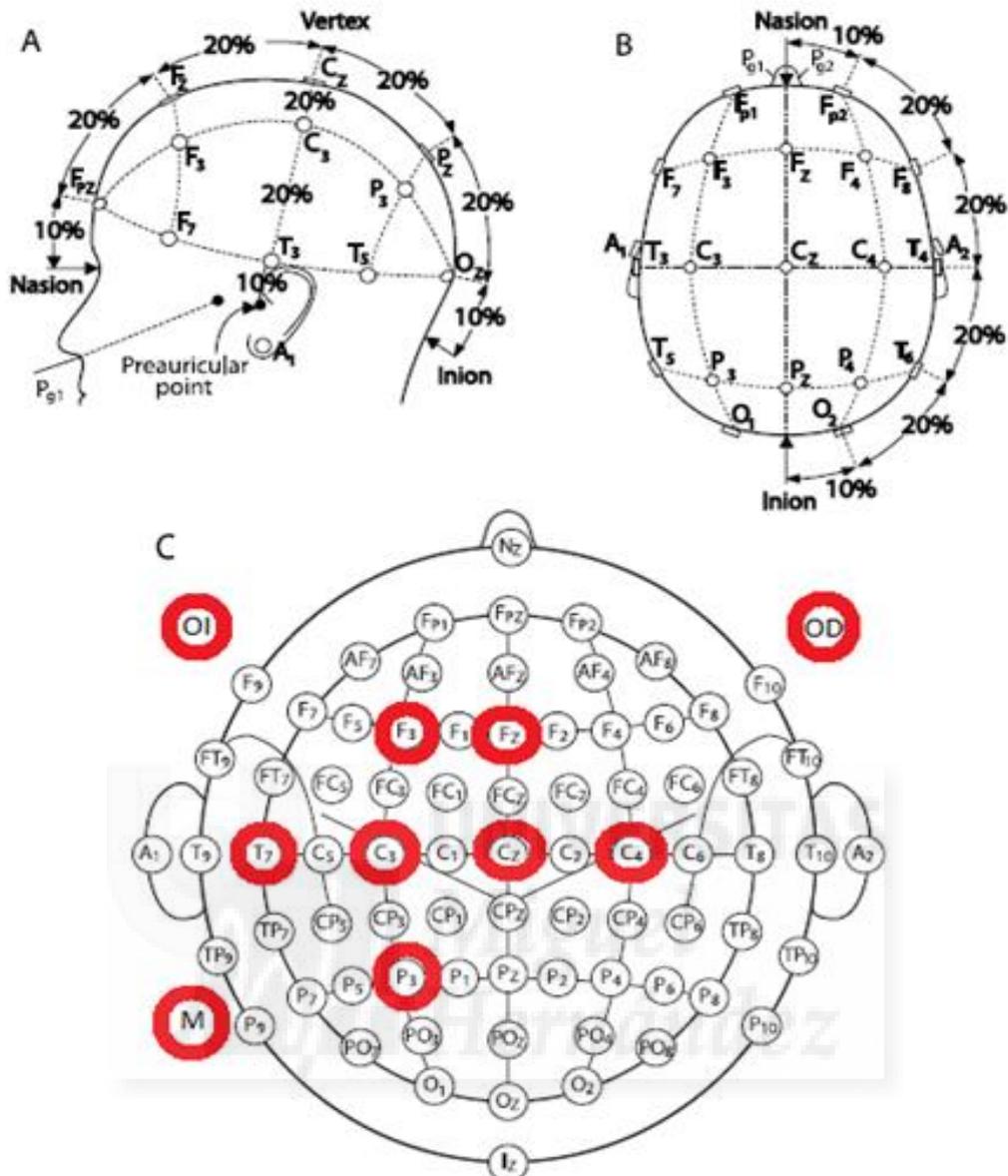


Figura 2: Colocación de electrodos según el Sistema 10-20.

Los números 10 y 20 se refieren a las distancias totales entre puntos del cráneo, a partir de los cuales se realizan las medidas. Estos puntos clave son: Nasion (entre frente y nariz), Inión (protuberancia occipital) y el punto prearticular (delante del trago del pabellón de cada oreja). Cada ubicación para un electrodo se define por una letra, que identifica el lóbulo, y un número, que identifica el hemisferio. Así, se diferencian cinco zonas: F (frontal), T (temporal), C (central), P (parietal) y O (occipital). Aunque no existe un lóbulo central, la letra C se emplea únicamente con fines de identificación. La Z (cero) se refiere a un electrodo colocado en la línea media. Los números pares (2, 4, 6, 8) se refieren a las posiciones de los electrodos en el hemisferio derecho, mientras que los impares (1, 3, 5) se refieren a las posiciones de los electrodos en el hemisferio izquierdo.

A: Vista desde el plano sagital lateral izquierdo del posicionamiento de electrodos.

B: Vista desde el plano transversal superior.

C: Esquema del posicionamiento de electrodos. Las posiciones señaladas en rojo son las empleadas en este estudio.

Imagen tomada del libro “A Practical Guide to Brain-Computer Interfacing with BCI2000” de Gerwin Schalk y Jürgen Mellinger.

[OI: Ojo izquierdo, OD: Ojo derecho, M: Mastoides]



Figura 3: Casco de neopreno empleado durante el estudio.

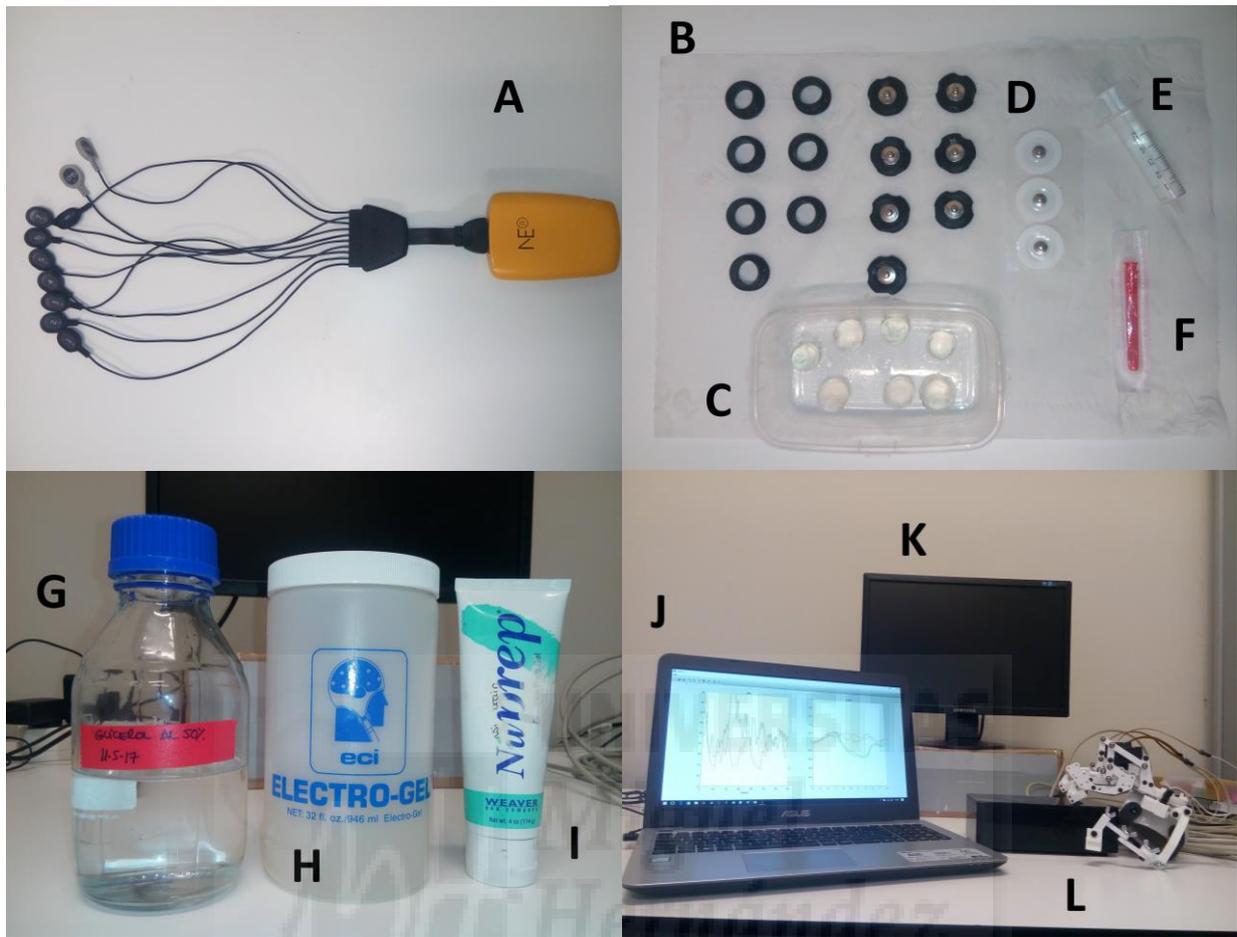


Figura 4: Material empleado durante el estudio.

A: Control Box y Conector, se conectan a los electrodos y envían las señales captadas vía Bluetooth hasta el ordenador.

B: Electrodo, se colocan en las ubicaciones del casco, convierten la actividad cerebral en señales eléctricas.

C: Gel conductor sólido.

D: Electrodo para EOG, son colocados próximos a los ojos y en la mastoides izquierda.

E: Jeringa, para recoger el gel conductor.

F: Aguja con punta roma, empleada para atravesar el pelo y alcanzar el cuero cabelludo.

G: Glicerol, se utiliza para humedecer el gel conductor sólido.

H: Gel conductor líquido.

I: Gel abrasivo, reduce la impedancia retirando el exceso de grasa de la piel, antes de colocar un electrodo EOG.

J: Ordenador con BCI2000 instalado.

K: Pantalla externa desde la que se muestran los estímulos y respuestas a los sujetos.

L: Exoesqueleto de mano derecha.

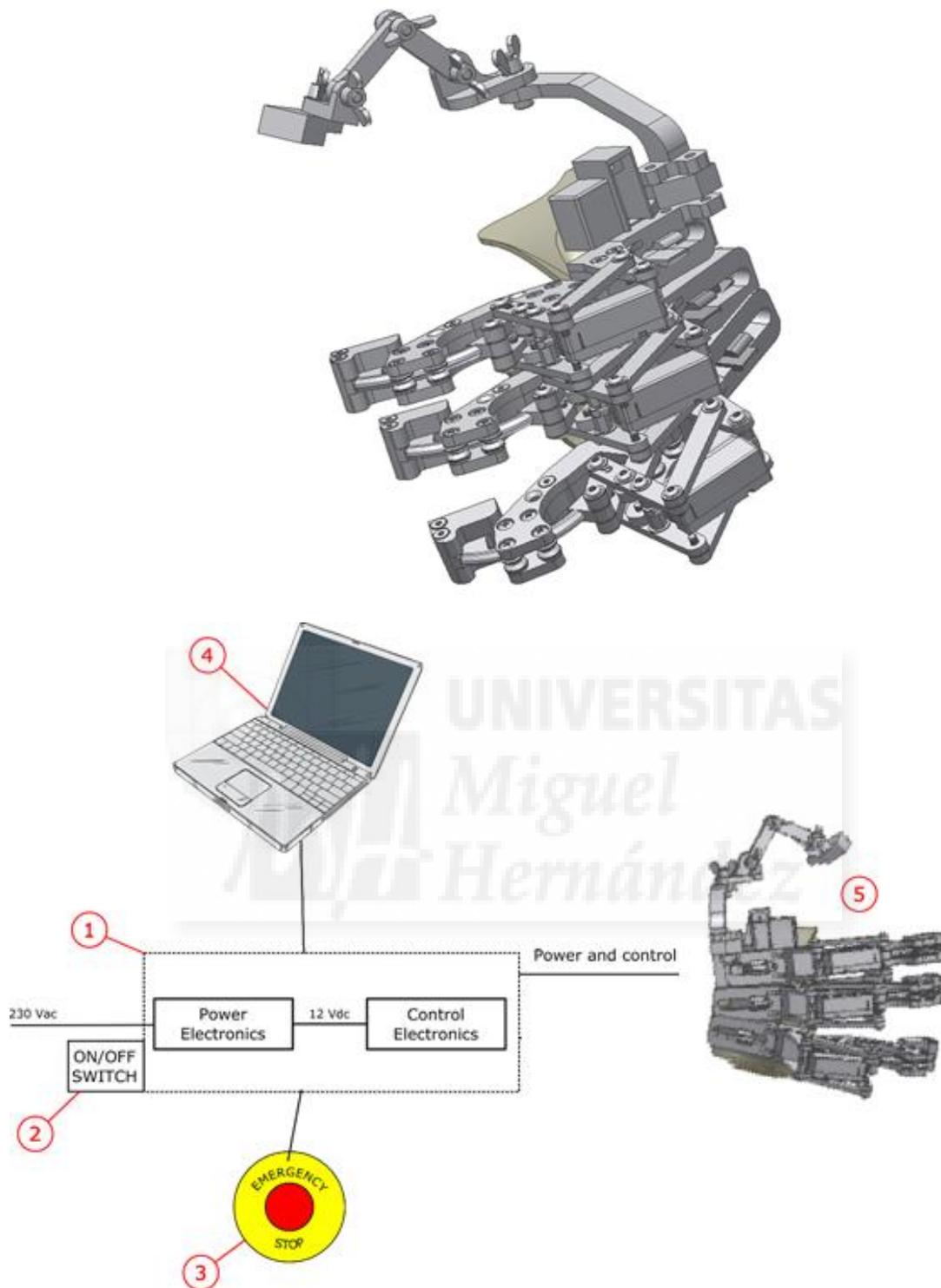


Figura 5: Exoesqueleto de la mano.

Descripción del sistema:

1. Caja de electrónica.
2. Interruptor de encendido.
3. Parada de emergencia.
4. Ordenador con controlador de alto nivel.
5. Exoesqueleto de mano.

Imágenes facilitadas por el Grupo de Investigación Biomédica de Neuroingeniería de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

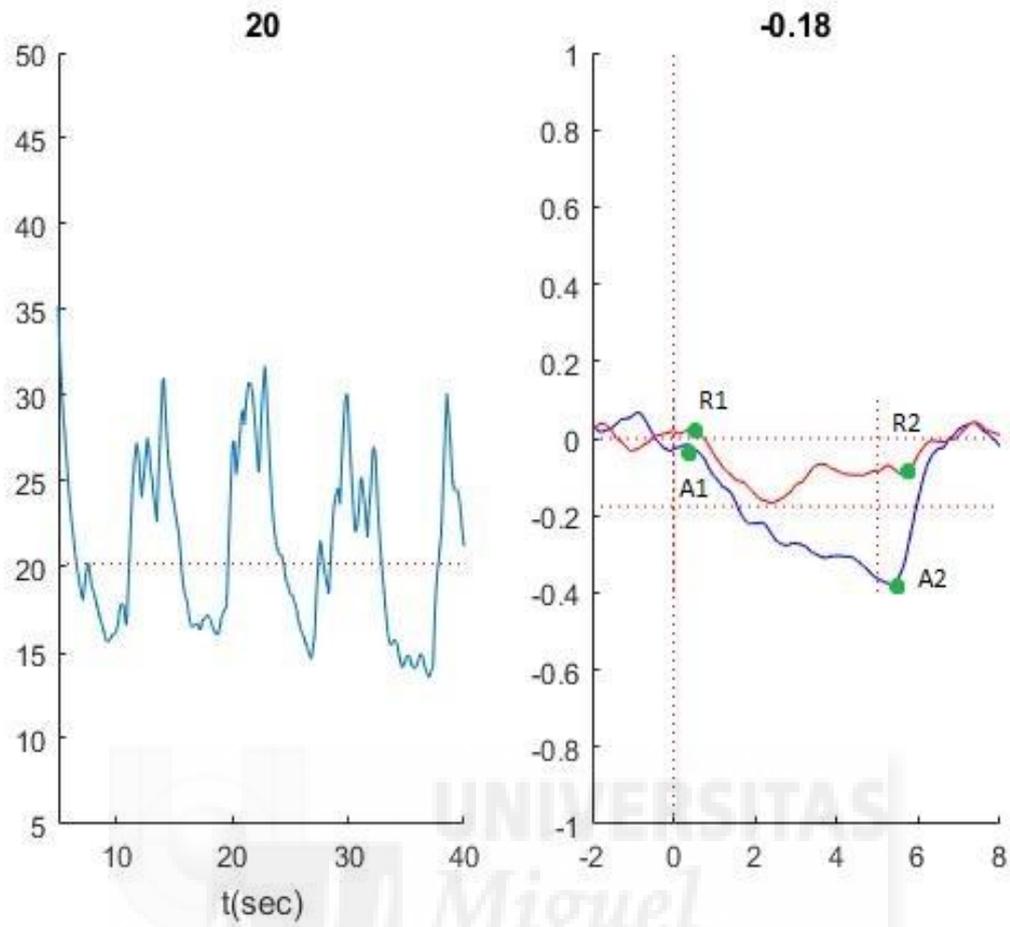


Figura 6: Obtención de puntos de las curvas.

EEG según modalidades de estímulo en una tarea BCI

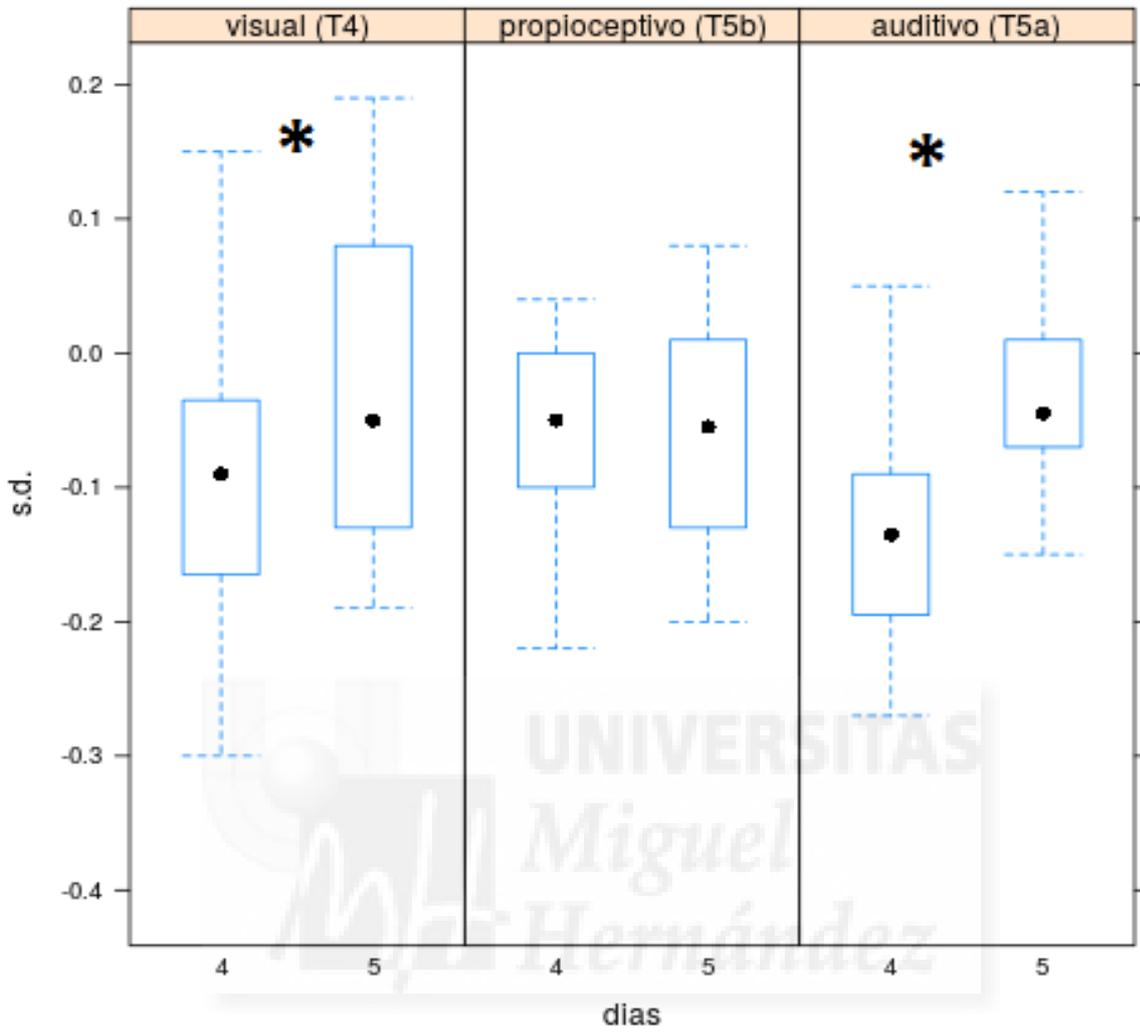
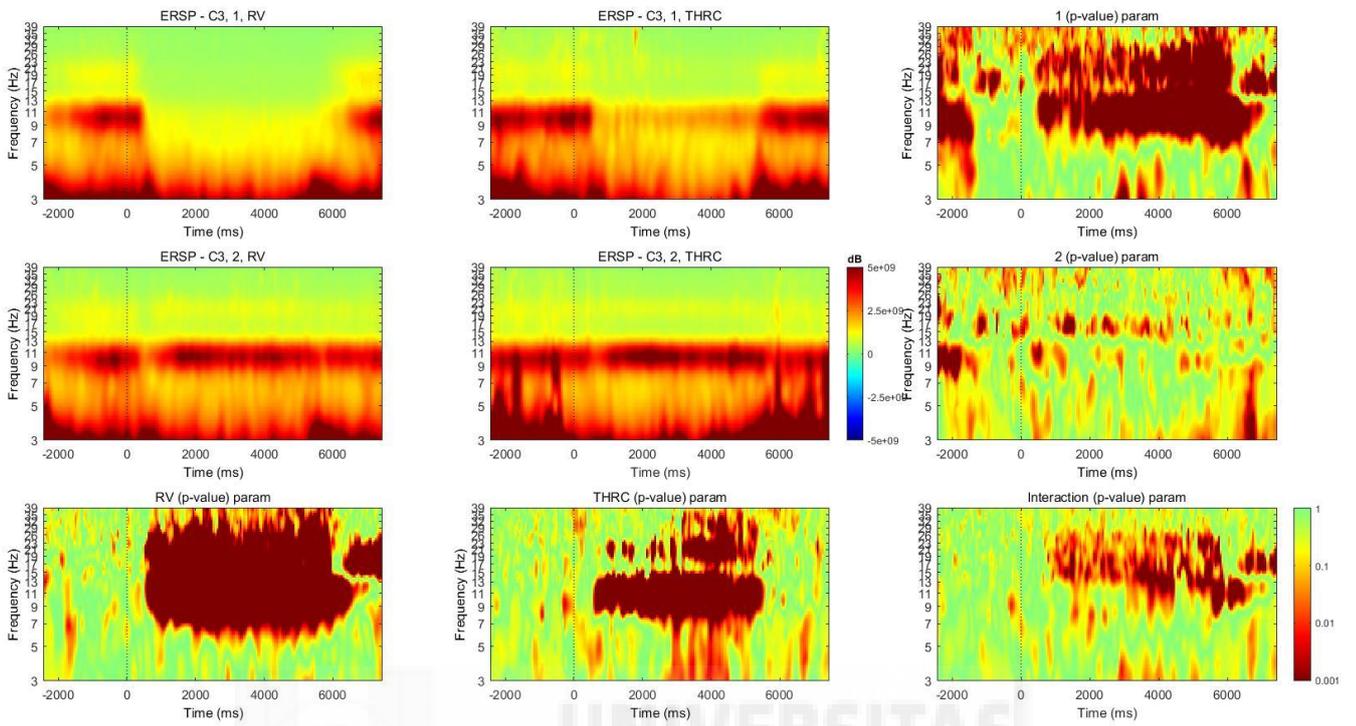


Figura 7: EEG según modalidades de estímulo en una tarea BCI.

A



B

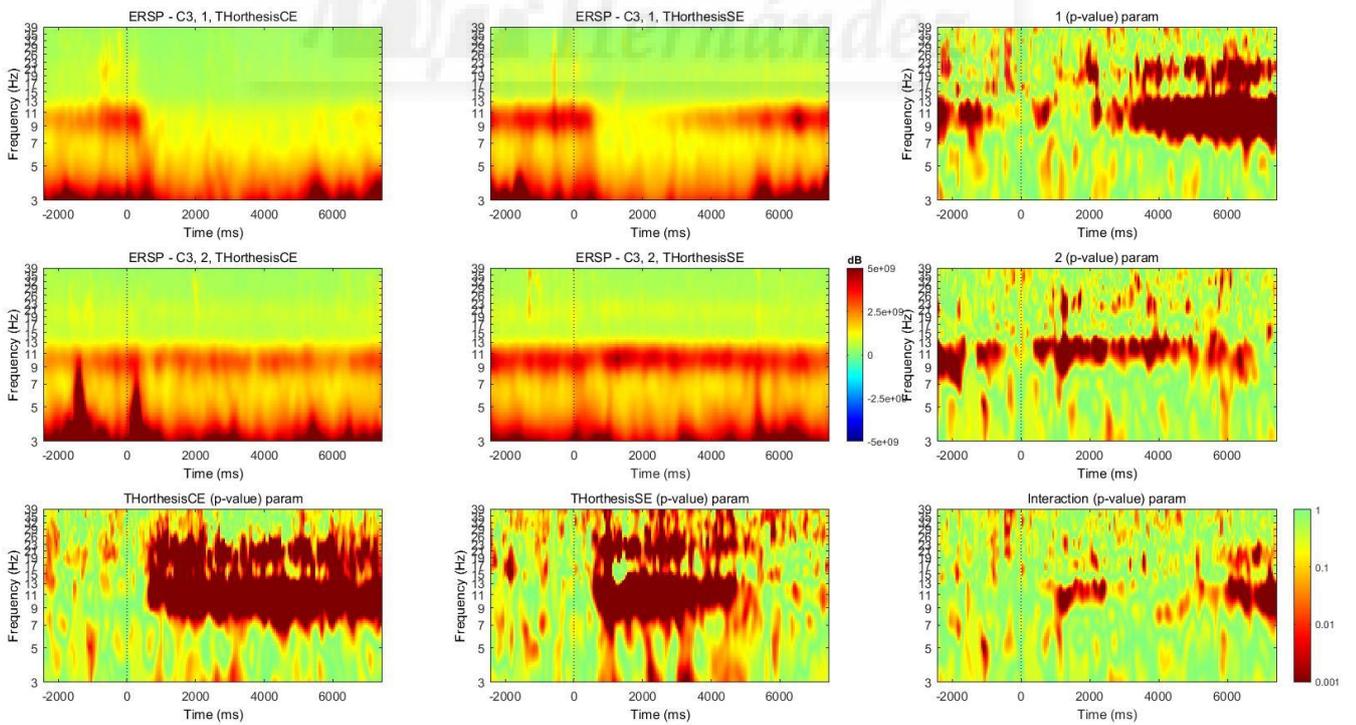


Figura 8: Análisis de las señales EEG con EEGLAB

A: Comparativa movimiento activo VS. IM con *feedback* visual.

La primera imagen a la izquierda representa el RSM cuando se abre y cierra la mano activamente. La imagen contigua a la derecha muestra el RSM cuando aparece el estímulo IMAGINE y la media circunferencia amarilla que se cierra. Y la siguiente a la derecha, representa el nivel de significación entre las dos imágenes descritas anteriormente.

Las imágenes de la fila central muestran el RSM durante el estímulo RELAX. A la izquierda, en la tarea que combina este estímulo y movimiento activo, y en el centro, con respuesta visual. A la derecha, la imagen muestra el nivel de significación de las imágenes anteriores.

Las imágenes de la última fila muestran los niveles de significación de las imágenes superiores de su misma columna.

B: Comparativa IM con *feedback* propioceptivo VS. IM con *feedback* auditivo.

La primera columna de imágenes muestra el RSM cuando aparecen los estímulos IMAGINE/RELAX cuando los sujetos llevan el exoesqueleto de mano puesto, la imagen inferior muestra el nivel de significación entre las dos imágenes superiores.

La segunda columna muestra el RSM cuando se presentan los mismos estímulos y el exoesqueleto está encendido, pero está tapado con una caja, por lo que el *feedback* para el sujeto es el sonido robótico. La imagen inferior muestra los niveles de significación entre las dos imágenes superiores.

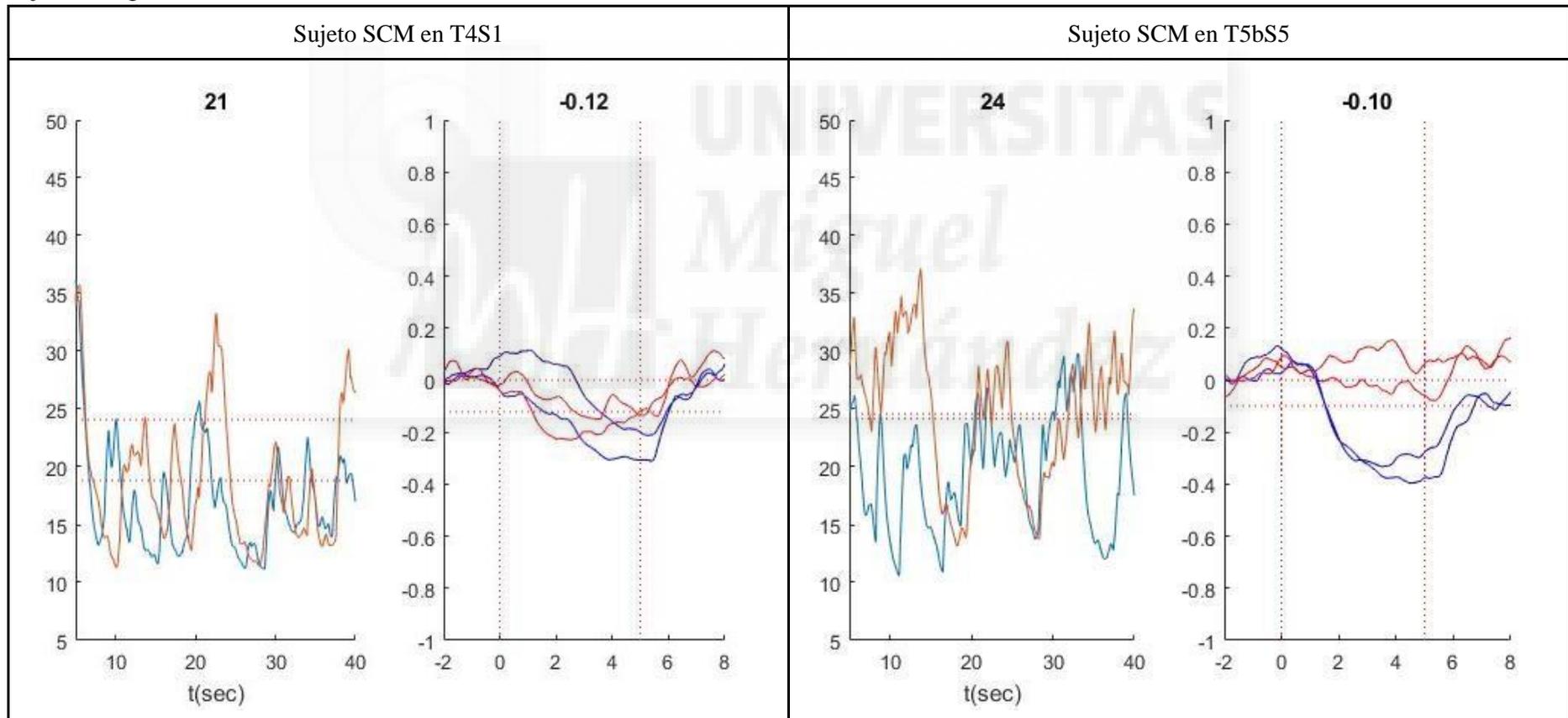
La tercera columna muestra también los niveles de significación entre las dos imágenes anteriores de su misma fila.

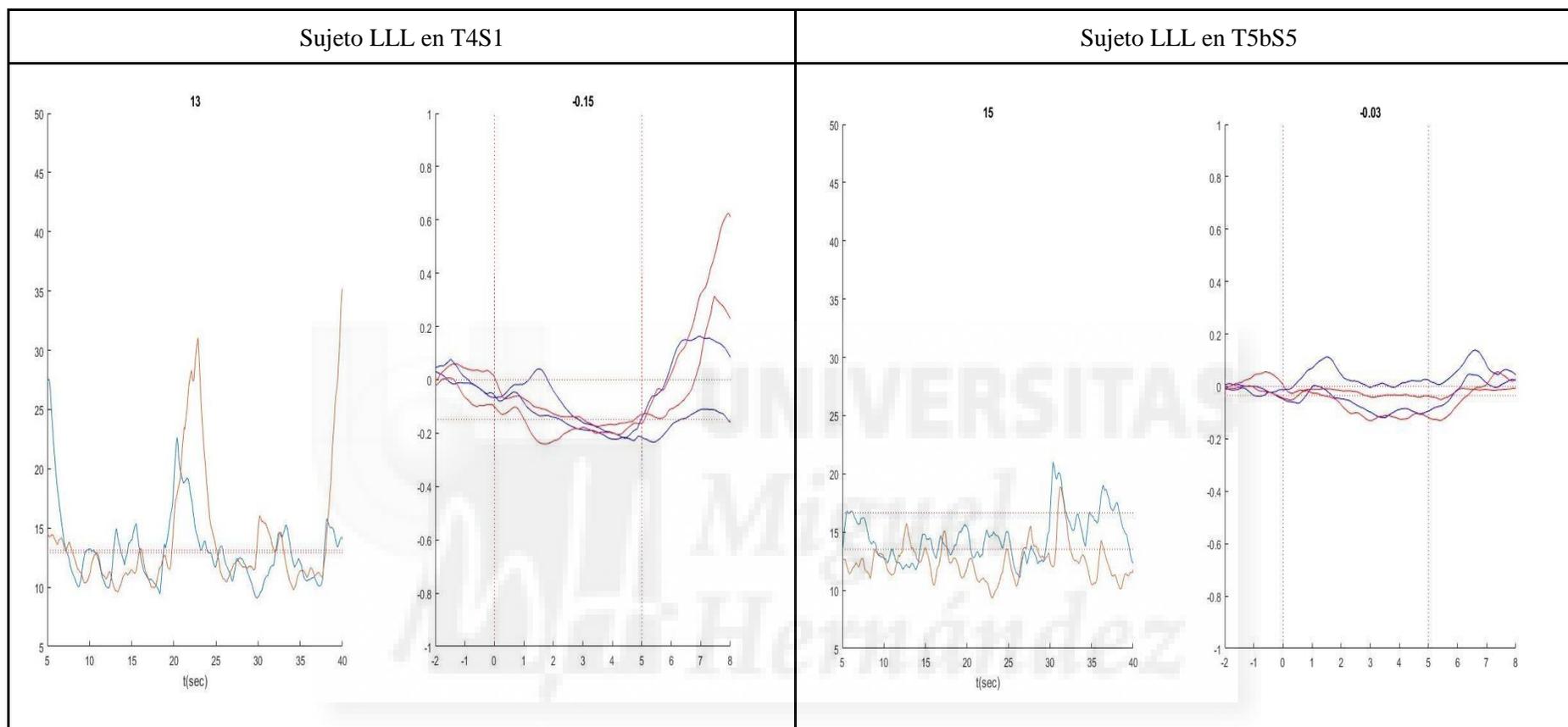


ANEXO DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de ejemplo entre un sujeto que aprende y otro que no aprende. La imagen de la izquierda muestra el EEG de la primera sesión de un sujeto durante la tarea 4 en la que se presentan los estímulos IMAGINE/RELAX. La modalidad sensorial de respuesta es visual. Aparece media circunferencia amarilla, que se cierra cuando detecta cambios en el RSM. Las líneas rojas muestran la AC durante el estímulo RELAX, y las líneas azules, durante el estímulo IMAGINE. Se observa que no consigue controlar todavía su AC entre los dos estímulos.

A la derecha, se muestra el EEG del mismo sujeto en la última sesión durante la tarea 5b, en la que lleva el exoesqueleto colocado en la mano. Este sujeto consigue variar su RSM entre los estímulos RELAX/IMAGINE.





Estas imágenes muestran dos EEGs de otro sujeto. A la izquierda, se muestra el RSM durante la T4 de la primera sesión, y a la derecha, la T5b de la quinta sesión, igual que en las dos imágenes anteriores. Como se puede observar, el sujeto no consigue dissociar entre los dos estímulos y su RSM se mantiene similar entre éstos.

Tabla 2: Datos Cualitativos.

SUJETO	SESIÓN	T4	T5a:SE	T5b:CE	T4S5	T5aS5	T5bS5	T4S4	T5aS4	T5bS4	¿Aprendizaje?
EFA	4	0	1	2	2	2	2	0	1	2	9
	5	2	2	2							
JAB	4	0	1	1	0	0	1	0	1	1	3
	5	0	0	1							
JCR	4	2	0	2	2	1	2	2	0	2	9
	5	2	1	2							
JMM	4	2	1	1	2	2	2	2	1	1	10
	5	2	2	2							
LLL	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0							
MGH	4	1	2	2	2	2	2	1	2	2	11
	5	2	2	2							
NRP	4	2	1	2	2	1	0	2	1	2	8
	5	2	1	0							
RIM	4	0	0	2	2	0	2	0	0	2	6
	5	2	0	2							
SCM	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	12
	5	2	2	2							
SEG	4	2	2	2	0	0	2	2	2	2	8
	5	0	0	2							
				Media:	1,4	1	1,5	1,1	1	1,6	

Leyenda:

0: No hay aprendizaje

1: Curvas en ambas tareas parcialmente separables.

2: Curvas completamente separables.

Tabla 3: Valores R1, A1, R2, A2 representados en el eje Y.

SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
SCM	4 (visual)	4	0,16	0,02	-0,14	-0,35	-0,3
		4	0,08	0,14	-0,14	-0,22	-0,22
		5	0,13	0,21	0,11	-0,29	-0,02
		5	0,22	0,25	0,11	-0,33	-0,11
	5A:SE (auditivo)	4	0,09	0,17	-0,14	-0,39	-0,23
		4	0,09	0,15	-0,11	-0,34	-0,2
		5	0,08	0,08	-0,05	-0,38	-0,13
		5	0,18	0,36	0,12	-0,3	-0,06
	5B:CE (propioceptivo)	4	0,06	0,12	-0,13	-0,34	-0,19
		4	0,11	0,13	-0,05	-0,24	-0,16
5		0,08	0,07	-0,08	-0,33	-0,16	
5		0,09	0,13	0,03	-0,39	-0,06	
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
NRP	4	4	0,12	0,11	0,15	-0,36	0,03
		4	0,16	0,03	0,02	-0,12	-0,14
		5	0,02	-0,03	-0,07	-0,13	-0,09
		5	0,12	0,05	-0,07	-0,21	-0,19
	SE	4	0	0,06	-0,15	-0,03	-0,15
		4	0,07	0,1	0,05	-0,25	-0,02
		5	0,02	0,11	-0,07	-0,18	-0,09
		5	0,02	0,04	-0,1	-0,08	-0,12
	CE	4	0,04	0,3	0,17	-0,16	0,13
		4	0,02	0,28	0,04	-0,14	0,02
5		0,01	0,29	-0,06	0,04	-0,07	
5		0,18	0,13	-0,03	-0,2	-0,21	

SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
LLL	4	4	0,03	0,04	-0,01	-0,07	-0,04
		4	0,04	0,17	-0,07	-0,11	-0,11
		5	0,09	0,11	0,08	-0,16	-0,01
		5	0,12	0,18	-0,03	-0,12	-0,15
	SE	4	0	0,14	-0,12	0,01	-0,12
		4	0	0,23	-0,07	-0,08	-0,07
		5	0,05	0,09	0	-0,09	-0,05
		5	0	0,17	-0,06	-0,08	-0,06
	CE	4	0,01	0,19	-0,1	-0,08	-0,11
		4	0,05	0,14	-0,14	-0,11	-0,19
		5	0,05	0	-0,13	-0,1	-0,18
		5	-0,01	0,11	-0,05	0	-0,04
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
JMM	4	4	0,01	0,06	-0,1	-0,22	-0,11
		4	0,13	0,09	-0,07	-0,18	-0,2
		5	0,21	0,07	-0,17	-0,24	-0,38
		5	0,12	0,24	-0,13	-0,24	-0,25
	SE	4	0,13	0,13	-0,16	-0,16	-0,29
		4	0,19	0,21	-0,07	-0,14	-0,26
		5	0	0,11	-0,04	-0,15	-0,04
		5	0,02	0,11	0,01	-0,13	-0,01
	CE	4	0,1	0,04	-0,08	-0,14	-0,18
		4	0,19	0,21	-0,1	-0,14	-0,29
		5	0,19	0,1	0,08	-0,14	-0,11
		5	0,22	0,19	-0,05	-0,07	-0,27
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1

RIM	4	4	0,08	0,25	-0,07	-0,32	-0,15
		4	0,17	0,14	-0,26	-0,21	-0,43
		5	0,2	0,17	0,19	-0,29	-0,01
		5	0,05	-0,02	-0,13	-0,4	-0,18
	SE	4	0,16	0,04	-0,27	-0,32	-0,43
		4	-0,05	0,19	-0,24	-0,29	-0,19
		5	-0,08	0,24	-0,03	-0,24	0,05
		5	0,05	0,19	-0,29	-0,19	-0,34
	CE	4	0,24	-0,06	-0,09	-0,19	-0,33
		4	0,2	0,15	-0,03	-0,19	-0,23
		5	0,1	0	-0,13	-0,19	-0,23
		5	0,17	0,32	0,01	-0,19	-0,16
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
JCR	4	4	0,1	0,24	-0,15	-0,37	-0,25
		4	0,13	-0,04	-0,09	-0,3	-0,22
		5	0,12	0,1	-0,1	-0,18	-0,22
		5	0,2	-0,04	0	-0,26	-0,2
	SE	4	0,16	0,33	-0,13	-0,29	-0,29
		4	0,13	0,04	-0,23	-0,28	-0,36
		5	0,15	0,15	0	-0,24	-0,15
		5	0,17	0,09	-0,06	-0,09	-0,23
	CE	4	0,12	0,13	-0,01	-0,36	-0,13
		4	0,1	0	0,01	-0,3	-0,09
		5	0,06	0,17	-0,07	-0,24	-0,13
		5	0,1	0,34	0,05	-0,05	-0,05
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
EFA	4	4	-0,08	-0,17	-0,3	-0,35	-0,22
		4	0,03	-0,15	-0,24	-0,31	-0,27

		5	0,08	-0,13	-0,15	-0,3	-0,23
		5	0	-0,15	0,05	-0,33	0,05
	SE	4	0,06	-0,27	-0,14	-0,26	-0,2
		4	0,09	0,04	-0,4	-0,29	-0,49
		5	0,21	0,07	0,08	-0,19	-0,13
		5	0,31	-0,06	0,16	-0,26	-0,15
	CE	4	0	-0,05	-0,15	-0,26	-0,15
		4	-0,03	0,14	-0,05	-0,13	-0,02
		5	-0,01	-0,05	-0,18	-0,27	-0,17
		5	0,04	-0,06	-0,13	-0,28	-0,17
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	R2-R1
MGH	4	4	0,02	0	0,01	-0,12	-0,01
		4	-0,04	0,06	-0,05	-0,13	-0,01
		5	0	0,05	0,04	-0,1	0,04
		5	0,28	0,05	0,13	-0,11	-0,15
	SE	4	0,18	0,11	0,05	-0,08	-0,13
		4	0,1	0,06	0,01	-0,09	-0,09
		5	0,1	0,03	0,04	-0,14	-0,06
		5	0,12	0,04	-0,05	-0,07	-0,17
	CE	4	0,13	0,03	0,02	-0,11	-0,11
		4	0,1	-0,03	0	-0,09	-0,1
		5	0,14	0	0,05	-0,11	-0,09
		5	0,11	0,05	0	-0,1	-0,11
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	
JAB	4	4	0,05	0,03	-0,09	-0,2	-0,14
		4	0	0	-0,19	-0,06	-0,19
		5	0,02	0,09	-0,15	-0,36	-0,17

		5	-0,03	-0,03	-0,19	-0,11	-0,16
							0
	SE	4	-0,07	-0,02	-0,19	-0,18	-0,12
		4	0,03	0,03	-0,13	-0,18	-0,16
		5	-0,04	-0,04	-0,2	-0,12	-0,16
		5	-0,05	0,04	-0,15	-0,15	-0,1
							0
	CE	4	0,03	0,07	-0,08	-0,2	-0,11
		4	0,1	0,07	-0,22	-0,09	-0,32
		5	-0,08	0,07	-0,2	-0,12	-0,12
		5	0,06	0,04	-0,18	-0,23	-0,24
SUJETO	TAREA	SESIÓN	R1	A1	R2	A2	
SEG	4	4	0	-0,1	-0,18	-0,25	-0,18
		4	-0,1	0,01	-0,02	-0,2	0,08
		5	-0,12	-0,19	-0,17	-0,19	-0,05
		5	-0,12	-0,1	-0,01	-0,13	0,11
							0
	SE	4	-0,02	-0,07	-0,11	-0,26	-0,09
		4	-0,02	0,03	-0,2	-0,13	-0,18
		5	0,08	-0,04	-0,02	-0,19	-0,1
		5	-0,1	-0,05	-0,13	-0,14	-0,03
							0
	CE	4	0,08	0,04	0,01	-0,18	-0,07
		4	0,03	0,1	-0,11	-0,23	-0,14
		5	0,29	0,03	0,01	-0,08	-0,28
		5	0	-0,01	0	-0,2	0



ANEXO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE ENTRENAMIENTO

o SESIÓN 1:

Se explica al sujeto en qué consiste la intervención y se les facilita un consentimiento informado, se les explica todo lo relacionado con el estudio experimental al que entrarían a formar parte. En él se detallan los datos esenciales como la finalidad del estudio, aclaraciones y procedimientos.

El entrenamiento comienza con una sesión de 10 minutos de duración sobre meditación, propiocepción, conocimiento y percepción del concepto de “Imaginación Motora”. También se intenta que el sujeto entre en un estado de relajación y plena conciencia y atención de las tareas que se van a pedir a continuación.

Tras esta sesión se procede a la colocación del casco y al comienzo de las tareas de entrenamiento, llevadas a cabo por el sujeto:

- Tarea 1: Experimento EOG (electrooculograma).

Una vez colocados el casco y los electrodos en la cabeza del sujeto, y estos están conectados al ordenador principal, se le pide al sujeto que se sienta enfrente de la pantalla y de cara a la misma. Cuando la tarea comienza, aparece una flecha que indica dirección derecha o izquierda en el centro de la pantalla. Tras unos segundos, esta flecha desaparece y aparece otra. La dirección de las flechas es aleatoria. El sujeto debe hacer un barrido ocular horizontal tan lejos y rápido como alcance en la dirección de la flecha que aparece en la pantalla sin mover cabeza ni cuello, para volver después de nuevo al centro de la pantalla con la mirada. La tarea tiene una duración aproximada de dos minutos y se realiza dos veces.

Con esta tarea se obtiene el valor EOG, que registra las variaciones de voltaje que ocurren con el movimiento angular del ojo. Este valor es necesario para tareas posteriores.

También se obtiene el valor RV, el cual refleja el valor basal del ritmo sensoriomotor de la corteza motora izquierda.

- Tarea 2: Experimento RV (Ritmo Sensoriomotor).

Cuando la tarea comienza, en la pantalla aparecen dos órdenes (o estímulos) que se van alternando de manera aleatoria:

- CLOSE: Mientras esta palabra aparece en la pantalla, unos 4 segundos, el sujeto abre y cierra su mano derecha unas 4 veces (abrir-cerrar/segundo). Además de realizarlo, el sujeto tiene que pensar e imaginar el movimiento que está realizando.
- RELAX: Mientras aparece esta palabra en la pantalla, el sujeto deja la mente en blanco y/o piensa en algo que no implique movimiento.

Durante el tiempo que no aparece ninguno de los dos estímulos, el sujeto permanecerá relajado y no pensará en nada que implique movimiento. La tarea tiene una duración aproximada de 4 minutos y se realiza dos veces.

Con esta tarea, se vuelve a recoger el valor RV, que nos sirve para corroborar si el ritmo sensoriomotor ha aumentado con la actividad de la corteza motora.

- Tarea 3. Cuando la tarea comienza, en la pantalla aparecen dos órdenes (o estímulos) que se van alternando de manera aleatoria:

- CLOSE: Mientras esta palabra aparece en la pantalla, unos 4 segundos, el sujeto abre y cierra su mano derecha unas 4 veces (abrir-cerrar/segundo). Además de realizarlo, el sujeto tiene que pensar e imaginar el movimiento que está realizando.
- IMAGINE: Mientras aparece esta palabra en la pantalla, el sujeto piensa e imagina el movimiento de abrir y cerrar la mano sin realizarlo activamente.

Además de estos dos estímulos aparece una nueva figura que actúa de feedback visual, media esfera amarilla sobre cada palabra, que se cerrará si el sujeto activa el córtex motor izquierdo y permanecerá inmóvil si no lo hace. La tarea tiene una duración aproximada de cuatro minutos y se repite dos veces.

Con esta tarea se corrobora si el valor RV anteriormente recogido es correcto, ya que, si este valor es muy alto, la media esfera se cerrará más rápidamente pues detecta mayor actividad motora cuando el sujeto no se está esforzando realmente y por tanto es necesario disminuir este valor. Si el valor RV es muy bajo, para el sujeto será “más difícil” cerrar la media esfera, aunque esté esforzándose en realizar e imaginar el movimiento.

- Tarea 4: Al comenzar la tarea, aparecen dos órdenes (o estímulos), que se van alternando de manera aleatoria:
 - IMAGINE: Mientras aparece esta palabra en la pantalla, el sujeto tiene que pensar e imaginar el movimiento de abrir y cerrar la mano sin realizarlo activamente.
 - RELAX: Mientras aparece esta palabra en la pantalla, el sujeto deja la mente en blanco y/o piensa en algo que no implique movimiento.

Al igual que en la tarea 3, aparece como feedback visual la media esfera amarilla, que se cierra si la tarea se lleva a cabo correctamente.

En esta tarea se incluye el valor EOG como un parámetro que sirve al paciente para “abortar” o “interrumpir” con un barrido visual hacia la derecha en caso de que la media esfera amarilla se cierre durante la fase RELAX, pues significa que detecta actividad motora cuando se supone que no la hay.

o **SESIÓN 2:**

Al comienzo de la sesión, al sujeto se le aplica el Cuestionario de Imaginación Cinestésica y Visual (KVIQ) (explicado en otro apartado).

Tras la aplicación del Cuestionario nombrado, el paciente realiza las cuatro mismas tareas de entrenamiento ya descritas en la primera sesión.

o **SESIÓN 3:**

Esta sesión comienza con la misma sesión de meditación y propiocepción aplicada durante la primera sesión, con la finalidad de refrescar la percepción del concepto de IM y que tiene una duración aproximada de 10 minutos.

Tras esta sesión, el paciente realiza las cuatro tareas de entrenamiento ya descritas anteriormente.

o **SESIÓN 4:**

Esta sesión comienza con la realización de las cuatro tareas de entrenamiento directamente. Al final, se añade una tarea nueva:

- **Tarea 5:**

En esta tarea activamos el exoesqueleto. Se subdivide a su vez en dos tareas, cada una dura unos cuatro minutos y se repite dos veces cada una:

- ❖ **Feedback auditivo:** En la tarea aparecen los dos mismos comandos o estímulos en la pantalla que en las tareas 4, la media esfera amarilla sólo aparece en la fase de RELAX. El exoesqueleto está encima de la mesa, entre el sujeto y la pantalla, tapado con una caja de cartón. El feedback auditivo ocurre cuando el sujeto piensa y/o imagina el movimiento, pues de realizarlo correctamente, el exoesqueleto se cierra y se abre, emitiendo un sonido mecánico.
- ❖ **Feedback propioceptivo:** Varía con respecto a la tarea anterior en que el sujeto lleva puesto en su mano derecha el exoesqueleto. El feedback, inevitablemente, es propioceptivo, visual y auditivo.

o **SESIÓN 5:**

Esta última sesión comienza con la aplicación al sujeto del Cuestionario de Imaginación Cinestésica y Visual (KVIQ), con la finalidad de averiguar si sus percepciones mentales de los movimientos han mejorado con respecto a la segunda sesión.

Después, se llevan a cabo las cinco tareas de entrenamiento, al igual que en la sesión 4.

ANEXO 2: GUIÓN PARA LA SESIÓN DE MEDITACIÓN PREVIA A ENTRENAMIENTO CON BCI

1. Desconectar cualquier aparato que pueda disminuir la atención o la concentración en la tarea.
2. Sentados y relajados, con los ojos cerrados.
3. Vamos a comenzar la sesión centrándonos en la respiración, colocamos una mano en el abdomen y otra en el pecho y sentimos nuestra respiración predominante. Sentimos la diferencia entre la mano que se encuentra en el pecho y la que está en el abdomen. Intentamos coger aire por la nariz, y los dirigimos al abdomen, hinchando la barriga y percibiendo como se mueve la mano que está sobre ésta. Expulsamos el aire con la boca entreabierta. Repetimos 5 respiraciones.
4. Relajamos los hombros y brazos, dejamos caer las manos con la palma de las manos hacia arriba sobre los muslos. Nos centramos en la posición de las manos: no tenemos ninguna tensión en los dedos.
5. Nos concentramos ahora en nuestro brazo derecho, concretamente en la mano. La abrimos y cerramos suavemente y sentimos el movimiento. Notamos como los dedos se flexionan, acercándose cada vez más la punta de los dedos a la palma hasta que cerramos el puño. Abrimos la mano de nuevo y lentamente volvemos a repetir. Pensamos el movimiento y lo interiorizamos, lo principal es imaginarse el movimiento.

Ahora, dejamos de mover la mano, pero seguimos teniendo conciencia del movimiento. Sin mover la mano podemos notar, que los dedos se van flexionando hasta cerrar el puño y vuelven a extenderse hasta relajarse. Pensamos únicamente en la acción, la imaginamos repetidamente.

6. Nos concentramos ahora en nuestro brazo izquierdo, concretamente en la mano. La abrimos y cerramos suavemente y sentimos el movimiento. Notamos como los dedos se flexionan, acercándose cada vez más la punta de los dedos a la palma hasta que cerramos el puño. Abrimos la mano de nuevo y lentamente volvemos a repetir. Pensamos el movimiento y lo interiorizamos, lo principal es imaginarse el movimiento.

Ahora, dejamos de mover la mano, pero seguimos teniendo conciencia del movimiento. Sin mover la mano podemos notar, que los dedos se van flexionando hasta cerrar el puño y vuelven a extenderse hasta relajarse. Pensamos únicamente en la acción, la imaginamos repetidamente.

BIBLIOGRAFÍA

- D. García Carrasco, J. Aboitiz Cantalapiedra. Effectiveness of motor imagery or mental practice in functional recovery after stroke: a systematic review. *Neurología*, Volume 31, Issue 1, January–February 2016, Pages 43-52.
- Guillot, Aymeric; Collet, Christian. Construction of the motor imagery integrative model in sport: a review and theoretical investigation of motor imagery use. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 2008, vol. 1, no 1, p. 31-44.
- Zimmermann-Schlatter, Andrea, et al. Efficacy of motor imagery in post-stroke rehabilitation: a systematic review. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2008, vol. 5, no 1, p. 8.
- Tamayo Martínez, Nathalie. Imaginería mental: neurofisiología e implicaciones en psiquiatría. *Revista Colombiana de Psiquiatría*, 2014, vol. 43, no 1, p. 40-46.
- Schieber, Marc H. Dissociating motor cortex from the motor. *The Journal of physiology*, 2011, vol. 589, no 23, p. 5613-5624.
- Palau-Baduell, Montserrat; Valls-Santassusana, Antonio; Salvadó-Salvadó, Berta. Trastornos del espectro autista y ritmo mu. Una nueva perspectiva neurofisiológica. *Rev Neurol*, 2011, vol. 52, no Supl 1, p. S141-6.
- Muñoz, Henríquez; Nureibis, Claudia. Estudio de Técnicas de análisis y clasificación de senales EEG en el contexto de Sistemas BCI (Brain Computer Interface). 2014. Tesis de Maestría.
- Alarid Escudero, Fernando, et al. Registro de señales de EEG para aplicaciones de Interfaz Cerebro Computadora (ICC) basado en Potenciales Evocados Visuales de Estado Estacionario (PEVEE). En IV Latin American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health. Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 87-90.

- Mulder, Th. Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation. *Journal of neural transmission*, 2007, vol. 114, no 10, p. 1265-1278.
- Ferreira Lage, Elisabete. La técnica de electroencefalografía en la evaluación de la actividad cortical motora. 2009.
- Jasper, Herbert H. The ten twenty electrode system of the international federation. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 1958, vol. 10, p. 371-375.
- Klem, George H., et al. The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1999, vol. 52, no 3, p. 3-6.
- Gómez Pilar, Javier, et al. Análisis de los cambios espectrales del EEG producidos por el entrenamiento neurocognitivo mediante una interfaz cerebro-ordenador. 2015.
- Vidaurre, Carmen; Blankertz, Benjamin. Towards a cure for BCI illiteracy. *Brain topography*, 2010, vol. 23, no 2, p. 194-198.
- Zich, Catharina, et al. Real-time EEG feedback during simultaneous EEG–fMRI identifies the cortical signature of motor imagery. *Neuroimage*, 2015, vol. 114, p. 438-447.
- Delorme, Arnaud; Makeig, Scott. EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 2004, vol. 134, no 1, p. 9-21.
- Rupp, Rüdiger. Challenges in clinical applications of brain computer interfaces in individuals with spinal cord injury. *Frontiers in neuroengineering*, 2014, vol. 7.
- Soekadar, Surjo R., et al. Brain–machine interfaces in neurorehabilitation of stroke. *Neurobiology of disease*, 2015, vol. 83, p. 172-179.