



TESIS DOCTORAL



Evaluación de estímulos visuales en una interfaz cerebro- ordenador basada en potenciales relacionados con eventos

Evaluation of visual stimuli on a brain-computer
interface based on event-related potentials

Álvaro Fernández Rodríguez

Dirigida por Ricardo Ron Angevin

Programa de Doctorado en Psicología

Facultad de Psicología

Universidad de Málaga

2021



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Álvaro Fernández Rodríguez

 <https://orcid.org/0000-0002-3421-976X>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

TESIS DOCTORAL

Evaluación de estímulos visuales en una interfaz cerebro-ordenador basada en potenciales relacionados con eventos

*Evaluation of visual stimuli on a brain-computer
interface based on event-related potentials*



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Álvaro Fernández Rodríguez

Director: Ricardo Ron Angevin

Tutora: María José Blanca Mena

Programa de Doctorado en Psicología

Facultad de Psicología

Universidad de Málaga

2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

Álvaro Fernández Rodríguez, estudiante del programa de doctorado de Psicología de la Universidad de Málaga, autor de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada “Evaluación de estímulos visuales en una interfaz cerebro-ordenador basada en potenciales relacionados con eventos” y realizada bajo la tutorización de María José Blanca Mena y dirección de Ricardo Ron Angevin,

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 27 de julio de 2021.

Fdo.: Álvaro Fernández Rodríguez
Doctorando

Fdo.: María José Blanca Mena
Tutora

Fdo.: Ricardo Ron Angevin
Director

DECLARACIÓN DE EXCLUSIVIDAD E IDONEIDAD DE LOS TRABAJOS QUE AVALAN LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO

Dr. Ricardo Ron Angevin, profesor titular del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga,

DECLARO QUE:

El trabajo de investigación realizado por el doctorando Álvaro Fernández Rodríguez, bajo mi dirección, con el título “Evaluación de estímulos visuales en una interfaz cerebro-ordenador basada en potenciales relacionados con eventos” reúne todas las condiciones exigidas por la normativa vigente para ser aceptado como Tesis de Doctorado, no habiéndose utilizado los artículos que avalan esta tesis por compendio de publicaciones en tesis anteriores; por lo que autorizo el inicio de los trámites para la defensa pública.

En Málaga, a 27 de julio de 2021.

Fdo.: Ricardo Ron Angevin

Director

Lista de publicaciones que avalan la tesis doctoral

- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., y Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of flashing stimuli shape and colour heterogeneity using a P300 brain-computer interface *speller*. *Neuroscience Letters*, 134385.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134385>
- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., y Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of emotional and neutral pictures as flashing stimuli using a P300 brain-computer interface *speller*. *Journal of Neural Engineering*, 16(5).
<https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab386d>
- Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., y Ron-Angevin, R. (2020). Effects of spatial stimulus overlap in a visual P300-based brain-computer interface. *Neuroscience*, 431, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.02.011>
- Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., y Ron-Angevin, R. (2021). Different effects of using pictures as stimuli in a P300 brain-computer interface under rapid serial visual presentation or row-column paradigm. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59(4), 869–881.
<https://doi.org/10.1007/s11517-021-02340-y>

Agradecimientos

Gracias a todos aquellos estímulos que han dado como respuesta esta tesis:

- Blanca Mena, María José
- da Silva Sauer, Leandro
- Espinet Rubio, Alfredo
- García Ferreira, Alejandro José
- Macías Sánchez, Silvio
- Medina Juliá, María Teresa
- Perea Ropero, María de las Mercedes
- Pérez Espejo, Daniel
- Rodríguez Truncer, María José
- Ron Angevin, Ricardo
- Sánchez Fernández, Antonio
- Thrippleton Rojano, Michael Anthony
- Varona Moya, Sergio
- Velasco Álvarez, Francisco

Agradecer también a todos los compañeros con los que he compartido lugar de trabajo por hacerme más fácil este camino, a los participantes de los experimentos por su paciencia y colaboración, al Causal Cognition Group de la Universidad de Málaga por transmitirme la pasión por la ciencia, a la École Nationale Supérieure de Cognitique (ENSC) de Burdeos por acogerme, a la Universidad de Málaga por instruirme, y al Ministerio de Ciencia e Innovación, la Agencia Estatal Investigación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional por la financiación de los proyectos LICOM (DPI2015-67064-R) y SICCAU (RTI2018-100912-B-I00). Asimismo, la presente tesis doctoral ha sido realizada bajo la convocatoria de ayudas para contratos predoctorales de 2016 (BES-2016-078756) ofertada por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Índice

Capítulo 1. Interfaces cerebro-ordenador basadas en potenciales relacionados con eventos visuales	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Fundamentos	4
1.3. Antecedentes relacionados	21
Capítulo 2. Estudios que avalan la tesis doctoral	25
2.1. Justificación de los trabajos presentados	25
2.2. Publicación de los trabajos presentados	29
Capítulo 3. Resumen global de resultados	33
3.1. Estudio 1.....	33
3.2. Estudio 2.....	37
3.3. Estudio 3.....	42
3.4. Estudio 4.....	47
Capítulo 4. Discusión	51
4.1. Resultados obtenidos y literatura relacionada	51
4.2. Limitaciones y posibles mejoras	59
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras	65
5.1. Conclusiones	65
5.2. Líneas futuras	66
Capítulo 6. English summary and conclusions.....	69
6.1. Summary	69
6.2. Conclusions	91
Capítulo 7. Referencias.....	93

Capítulo 1

Interfaces cerebro-ordenador basadas en potenciales relacionados con eventos visuales

1.1. Introducción

Las interfaces cerebro-ordenador (*brain-computer interfaces*, BCI) son un tipo de tecnología que utiliza la señal cerebral de un usuario para establecer un canal de comunicación entre él y un dispositivo (Vidal, 1973; Wolpaw et al., 2002). La principal ventaja de estos sistemas es que, inicialmente, no requieren del control muscular para su manejo. El canal empleado por las BCI para establecer la comunicación puede ser obtenido a través de diferentes técnicas de neuroimagen, tales como la electroencefalografía, la espectroscopia del infrarrojo cercano, la resonancia magnética funcional o la electrocorticografía (Nicolas-Alonso y Gomez-Gil, 2012; Yadav et al., 2020). Al prescindir del canal muscular, esta tecnología puede ser una opción adecuada para permitir la interacción con el entorno en aquellos pacientes con dicho canal completamente afectado o con imposibilidad de un uso adecuado. La investigación relativa a las BCI ha sido extensa, llevada a cabo por numerosos grupos a lo largo del mundo. De acuerdo a la *Web of Science* (<https://webofknowledge.com/>), desde 2015, se han publicado en este campo más de 500 trabajos al año en revistas científicas. El grupo UMA-BCI de la Universidad de Málaga lleva trabajando en estos sistemas desde hace más de diez años (<https://umabci.uma.es/>), y es donde se ha desarrollado la presente tesis doctoral.

Existen diversas patologías que provocan un deterioro de las capacidades motoras de los pacientes afectados, tales como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o el síndrome crónico de Guillain-Barré (Kiernan et al., 2011; Willison et al., 2016). Estas afecciones pueden dar lugar a una dificultad en el paciente para interactuar con su entorno. Para solventar este problema, la tecnología asistencial – entre la que se encuentran las BCI – sirve de herramienta para facilitar la interacción del usuario con dicho entorno (Alper y Raharinirina, 2006). Esta tecnología asistencial puede ser empleada para múltiples situaciones, como el control de una silla de ruedas, un sistema domótico o un sistema aumentativo y alternativo de comunicación (SAAC) (Jamwal et al., 2020). El punto clave de la tecnología asistencial es que esté adaptada a las habilidades del paciente. Por tanto, ésta deberá poder ser controlada a través de aquellos canales que el paciente tenga preservados, tales como la voz, movimientos musculares (p. ej., dedo, mejilla o lengua) o el uso directo de la señal cerebral. Algunos ejemplos de tecnología asistencial son sistemas controlados a través de micrófonos, sensores de baja presión, dispositivos de seguimiento ocular, o BCI (Elsahar et al., 2019). El problema es que, en patologías asociadas a una incapacidad motora severa, algunos de estos ejemplos de tecnología asistencial pueden quedar inutilizados debido a que dependan de cierto tipo de canal muscular que el paciente tenga afectado.

Hay afecciones que pueden dar lugar al estado de enclaustramiento (*locked-in state*, LIS), una condición en la cual la persona sólo mantiene movimientos oculares – aunque limitados en algunos pacientes – y parpadeos (Love y Biller, 2007). Este estado aún podría permitir el uso de algunos tipos de tecnologías asistenciales (p. ej., sistemas sencillos basados en el seguimiento ocular o la electrooculografía). No obstante, es posible que dicha ejecución motora no sea estable y/o requiera de un gran esfuerzo por parte del paciente, dando lugar a una experiencia negativa durante su intento de control (Spataro et al., 2014). Por tanto, resulta conveniente la necesidad de utilizar tecnología asistencial que requiera el mínimo de capacidad motora posible, tales como las BCI.

Una de las BCI más populares son aquellas basadas en los potenciales relacionados con eventos (*event-related potentials*, ERP). En una BCI basada en ERP (ERP-BCI), pueden utilizarse potenciales evocados a través de diferentes modalidades sensoriales: visual, auditiva y táctil. En caso de que el usuario no presente ningún déficit sensorial o motor, las ERP-BCI visuales son las que mejor rendimiento han mostrado en comparación a las otras

modalidades (Allison et al., 2020; Nicolas-Alonso y Gomez-Gil, 2012; Rezeika et al., 2018). No obstante, las ERP-BCI visuales requieren que la persona tenga la capacidad de estar atento a una interfaz gráfica. A pesar de ello, estos sistemas han mostrado resultados prometedores en usuarios con severos problemas de control muscular, como pacientes afectados por la ELA o la distrofia muscular de Duchenne (p. ej., Medina-Juliá et al. (2020) y Utsumi et al. (2018)), e incluso en la condición de LIS (Sellers et al., 2014). Por tanto, las ERP-BCI visuales pueden ser consideradas una tecnología válida para aquellos pacientes que tengan el canal visual disponible. La selección de un tipo u otro de tecnología asistencial basada en el canal visual (p. ej., una ERP-BCI visual o un sistema de seguimiento ocular) dependerá de las preferencias y habilidades preservadas del usuario (García et al., 2017; Pasqualotto et al., 2015).

Las propuestas presentadas por la comunidad científica basadas en una ERP-BCI visual han sido muy diversas. Sin embargo, las aplicaciones más utilizadas han sido los deletreadores, comúnmente conocidos como *spellers*, un tipo de SAAC que permite la comunicación verbal a través de la selección individual de letras en una interfaz gráfica (ver Rezeika et al. (2018) para una extensa revisión sobre *spellers* en BCI). La presente tesis doctoral quedará centrada en el estudio de estos dispositivos. Sin embargo, no hay impedimento por el que los avances mostrados no puedan ser aplicados al control de otros dispositivos, como un sistema domótico o una silla de ruedas (Corralejo et al., 2011; Iturrate et al., 2009).

Las ERP-BCI visuales son una tecnología que aún tiene un largo camino por recorrer para seguir mejorando y permitir su uso fuera de los laboratorios, como los hospitales o el hogar del paciente. Algunos aspectos que pueden ser mejorados para facilitar este salto son los siguientes: (a) conocimientos técnicos requeridos, (b) coste económico y (c) rendimiento. Actualmente, se están haciendo esfuerzos para facilitar la accesibilidad a esta tecnología y minimizar la necesidad de conocimientos técnicos para su utilización (Velasco-Álvarez et al., 2019). Con relación al alto coste económico, numerosos trabajos se han centrado en evaluar el rendimiento de dispositivos de bajo coste para valorar su viabilidad en futuros pacientes (Fontanillo Lopez et al., 2020). Sin embargo, donde más esfuerzos está dedicando la comunidad científica es en abordar el tercer inconveniente, concretamente, en mejorar el rendimiento de los usuarios controlando una ERP-BCI visual. Este último punto será en el cual ha sido enfocada la presente tesis doctoral.

1.2. Fundamentos

En esta sección se presentarán y describirán los fundamentos necesarios para comprender el funcionamiento básico de una ERP-BCI visual. En primer lugar, se describirá el tipo de señal electroencefalográfica (EEG) específica que emplearán estos sistemas, los ERP (sección 1.2.1). En segundo lugar, se explicará la arquitectura de una ERP-BCI visual para conocer los procesos primordiales involucrados desde que la señal es registrada hasta que es convertida en un comando (sección 1.2.2). En tercer lugar, se describirá el funcionamiento de la interfaz gráfica, es decir, la manera en la cual el usuario selecciona a voluntad los comandos disponibles del sistema (sección 1.2.3). En cuarto lugar, se expondrá el protocolo experimental generalmente utilizado para llevar a cabo una sesión de control de una ERP-BCI visual (sección 1.2.4). Finalmente, se dedicará un apartado a describir cómo se puede evaluar el rendimiento de estos sistemas, así como otras variables de interés (sección 1.2.5).

1.2.1. Potenciales relacionados con eventos

Los ERP pueden ser definidos como cambios en el voltaje de la señal EEG, en el dominio del tiempo, y relacionados con un evento sensorial, motor o cognitivo (Kappenman y Luck, 2012). Los ERP utilizados por las ERP-BCI son evocados por un evento sensorial, es decir, la presentación de un estímulo externo. Como se adelantó en la introducción, las ERP-BCI utilizadas en la presente tesis doctoral se basarán en los ERP evocados por la modalidad sensorial visual.

La técnica de neuroimagen más empleada por las BCI para el registro de los ERP visuales es la electroencefalografía (Allison et al., 2020). Dicha técnica es un método no invasivo que consiste en la colocación de diversos electrodos sobre la superficie del cuero cabelludo para medir las fluctuaciones de voltaje consecuencia de las corrientes iónicas entre neuronas. De forma más específica, lo que se registra es la suma de potenciales postsinápticos que ocurren simultáneamente en un conjunto de células piramidales orientadas en la misma dirección (Luck, 2014a). El sistema de referencia para la estandarización de las posiciones de los electrodos es el sistema internacional 10-20 (Klem et al., 1999) (figura 1). Es importante incidir en que la forma específica de los diferentes ERP (p. ej., su amplitud o polaridad) dependerá de diversos factores, entre los cuales se pueden destacar tres de los siguientes.

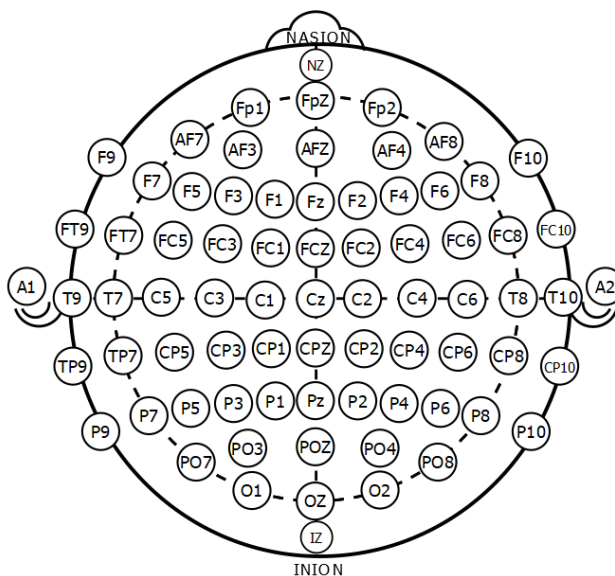


Figura 1. Sistema internacional 10-20 para la colocación de los electrodos en la electroencefalografía.

En primer lugar, la forma de la onda observada desde un determinado electrodo dependerá de la orientación del conjunto de células piramidales hacia dicho electrodo (Cohen, 2014; Luck, 2014a). Por tanto, electrodos colocados en diferentes localizaciones pueden mostrar una forma de onda diferente para un mismo evento neurofisiológico. En segundo lugar, debido a que el voltaje indicado en la localización del electrodo activo es medido con respecto a un punto de referencia (es decir, la diferencia de potencial entre la localización del electrodo activo y la del electrodo de referencia), dicho punto de referencia puede influir en la forma de onda obtenida (Cohen, 2019). Finalmente, la forma de onda también puede encontrarse afectada por la interacción entre diversos ERP, especialmente entre aquellos que se encuentran temporalmente adyacentes (Luck, 2014b). En definitiva, se debe ser extremadamente precavido a la hora de extraer conclusiones en base a la forma de onda de la señal EEG. La literatura previa y un buen diseño experimental serán las principales herramientas para poder extraer resultados que permitan obtener unas conclusiones adecuadas.

En el ámbito neurocientífico, el paradigma *oddball* ha sido el más empleado para el estudio de los ERP. Este paradigma consiste en la

presentación secuencial de un estímulo visual frecuente que es interrumpida por la presentación de un estímulo visual infrecuente y esperado por el participante (Luck, 2014a; Squires et al., 1975). El estímulo visual infrecuente que ha de ser atendido por el participante se denomina estímulo *target*, mientras que el resto de los estímulos presentados durante la ejecución del paradigma serán los *non-target*. De forma general, será el estímulo *target* aquel que produzca el ERP que se desea estudiar. Los cambios de voltaje de estos potenciales son relativamente pequeños en comparación al resto de variaciones de la señal EEG. Por tanto, para visualizar correctamente los diferentes ERP, generalmente, es necesario promediar un gran número de presentaciones del estímulo. De esta manera, las oscilaciones aleatorias de la señal EEG quedarán anuladas entre sí, dando lugar a la señal que fue evocada en cada presentación del estímulo infrecuente en el mismo intervalo temporal, es decir, los ERP (Cohen, 2014). La tarea del usuario suele consistir en contar mentalmente el número de veces que el estímulo *target* es presentado. Este paradigma *oddball*, con ligeras variaciones, es el empleado por las ERP-BCI visuales, cuya adaptación será detallada en la sección relativa a la interfaz gráfica (sección 1.2.3).

Las ERP-BCI visuales pueden apoyarse en diversos ERP para establecer el canal de comunicación entre el usuario y el dispositivo que desea controlar. Sin embargo, el potencial más utilizado es el P300 provocado por un estímulo visual (figura 2). Este componente corresponde a una deflexión positiva del voltaje de la señal EEG que se produce aproximadamente entre los 300 y 500 ms después de percibir el estímulo visual infrecuente (*target*) anteriormente mencionado en el paradigma *oddball* (Sutton et al., 1965). En una ERP-BCI

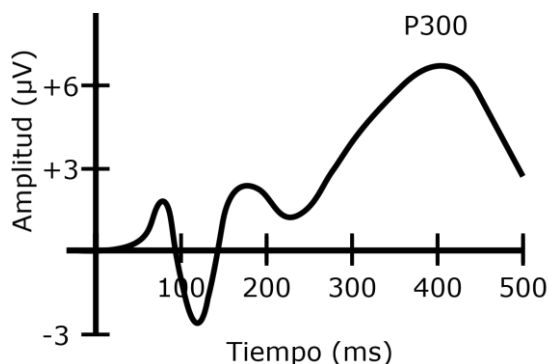


Figura 2. Forma de onda de un P300 estándar.

visual, este componente queda registrado, generalmente, en la línea central y región parietooccipital de la corteza cerebral (Krusienski et al., 2008). La amplitud del componente P300 provocado por un estímulo visual puede variar según diversos factores, tales como la probabilidad de aparición y la luminancia del estímulo infrecuente (Polich et al., 1996). Por tanto, estos factores deberían ser considerados cuando se diseñe una ERP-BCI visual.

Si bien es cierto que las ERP-BCI visuales suelen utilizar el componente P300, también se pueden evocar otros potenciales en la señal EEG. Ejemplos de estos potenciales son el N170, el cual se ve aumentado cuando los estímulos utilizados son caras (Kaufmann et al., 2011), o el N400, el cual se ve incrementado cuando los estímulos son de naturaleza semántica (p. ej., relación entre palabras) (Dijkstra et al., 2020). Estos otros potenciales también pueden ser utilizados por una ERP-BCI visual para discriminar entre estímulos *targets* y *non-targets*. De esta manera, a pesar de que en la literatura se usa comúnmente el término P300-BCI, en la presente tesis doctoral, este término y ERP-BCI serán usados como equivalentes.

1.2.2. Arquitectura

Para poder comprender el funcionamiento básico de una ERP-BCI visual, se deben diferenciar los procesos que permiten establecer el canal de comunicación entre el usuario y el dispositivo que desea controlar (figura 3). De acuerdo a Wolpaw et al. (2002), este proceso puede ser diferenciado en cuatro componentes: (a) adquisición de la señal, (b) procesamiento de la señal, (c) dispositivo de salida, y (d) protocolo de control.

a. Adquisición de la señal

El proceso de adquisición de la señal es aquel a través del cual se registra la señal EEG de interés. Dicha señal es del orden de microvoltios (μV) y de naturaleza analógica, por lo que debe ser amplificada y digitalizada para su posterior almacenamiento y procesamiento en el ordenador. Los amplificadores empleados para el registro de la señal EEG han de cumplir una serie de características, como presentar circuitos con alta ganancia e impedancia de entrada y un adecuado aislamiento frente a interferencias externas. La impedancia

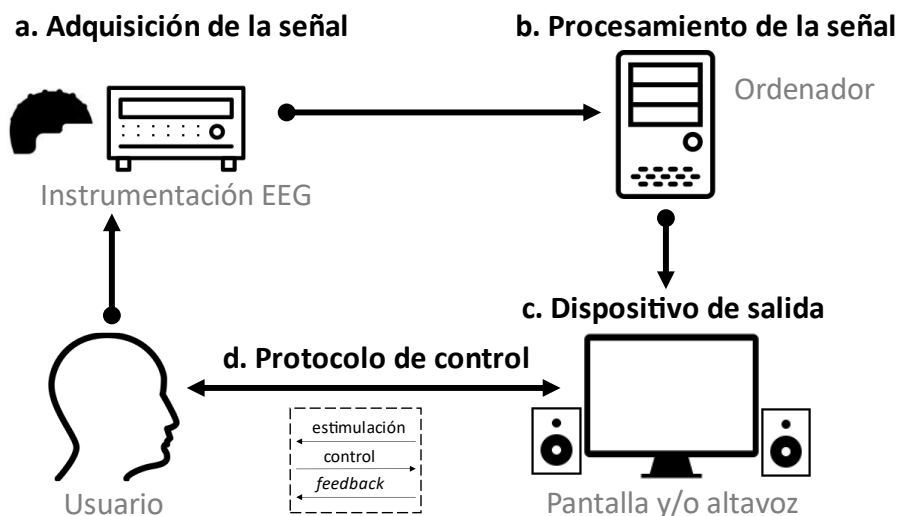


Figura 3. Estructura general de una interfaz cerebro-ordenador basada en potenciales relacionados con eventos.

entre el electrodo y la superficie del cuero cabelludo es otro factor importante, la cual debe ser reducida para conseguir un adecuado ratio entre señal y ruido (Kappenman y Luck, 2010). Para ello, hay que preparar la superficie del cuero cabelludo antes de proceder a la colocación de los electrodos. Este proceso suele implicar el uso de geles para la limpieza de dicha superficie, así como de un gel electroconductor para facilitar la transmisión de la señal EEG desde la corteza del cuero cabelludo hasta el electrodo¹. Para facilitar la correcta colocación de los electrodos, se suele emplear un gorro con orificios para la sujeción de éstos siguiendo el sistema internacional 10-20 (Klem et al., 1999).

b. Procesamiento de la señal

Dentro de este segundo apartado relativo al procesamiento de la señal en una ERP-BCI visual, se pueden diferenciar dos bloques: la

¹ Los dispositivos comerciales o de baja gama suelen usar electrodos secos, en los cuales no es necesario usar gel electroconductor. Sin embargo, dichos dispositivos presentan una baja ratio entre señal y ruido, lo que puede afectar negativamente al rendimiento del sistema (Mathewson et al., 2017).

extracción de características y la clasificación. Por un lado, la extracción de características tiene dos objetivos principales: (a) eliminar la presencia de artefactos en la señal EEG (p. ej., señal eléctrica de dispositivos cercanos o señal muscular producida por los parpadeos) que no han podido ser controlados durante la etapa de adquisición de la señal; y (b) identificar información discriminante de la señal EEG que ayude a su posterior clasificación de estímulos *target* y *non-target*. El desarrollo de algoritmos para la limpieza de la señal EEG y la extracción de características para el control de una ERP-BCI visual ha sido ampliamente estudiado. Algunos ejemplos de los algoritmos utilizados por la literatura previa de estos sistemas son los filtrados de la señal por frecuencias (paso-alto, paso-bajo y paso-banda), el análisis de componentes independientes (ICA) y el patrón espacial común (*common spatial pattern*, CSP) (Lotte et al., 2018). Por otro lado, la clasificación tiene como objetivo discriminar entre estímulos *target* y *non-target* gracias a las diferencias previamente obtenidas en la forma de onda de los ERP de cada estímulo. Los algoritmos de clasificación más populares empleados por las ERP-BCI visuales son el análisis lineal discriminante (*linear discriminant analysis*, LDA) y las máquinas de vectores de soporte (*support vector machines*, SVM) (Lotte et al., 2018).

c. Dispositivo de salida

El dispositivo de salida será aquel encargado de mostrar la interfaz de control y la selección del clasificador y, por tanto, de ofrecer el *feedback* al usuario. En el caso de los *spellers* basados en una ERP-BCI visual, el dispositivo de salida más común es la pantalla de un ordenador, donde se mostrarán cada una de las selecciones realizadas por el usuario. Asimismo, estos dispositivos también pueden ofrecer la salida por audio a través de los altavoces. No obstante, la salida por audio es más común cuando el usuario ha terminado de escribir su mensaje y desea que éste sea leído en voz alta para que lo escuchen las personas con quienes desea comunicarse. Otra opción es que el sistema sea capaz de enviar el mensaje del usuario a través de otras aplicaciones (p. ej., Twitter o Telegram) (Martínez-Cagigal et al., 2019).

d. Protocolo de control

El protocolo operativo definirá el funcionamiento de la ERP-BCI visual en su interacción con el usuario que la controlará. Este componente de la arquitectura consistirá en detallar parámetros como, por ejemplo, qué debe hacer el usuario para controlar el dispositivo, qué información se le ofrece en la interfaz o qué comandos de control tiene disponibles. Un factor común en las ERP-BCI visuales es la tarea que el usuario debe llevar a cabo para seleccionar los comandos disponibles por el sistema. Dicha tarea consistirá en que el usuario focalice su atención en el estímulo visual que se asocie al comando deseado (estímulo *target*), e ignore el resto (estímulos *non-targets*). El estímulo visual deseado provocará el ERP que debe ser identificado por el sistema. Debido a que la presente tesis doctoral tiene como objetivo mejorar el rendimiento a través de determinadas variaciones en la interfaz gráfica, el funcionamiento de una interfaz gráfica de una ERP-BCI visual será detallado en la siguiente sección (sección 1.2.3). El protocolo de control específico dependerá de numerosos parámetros, tales como el número de estímulos y comandos disponibles, el tiempo necesario para realizar cada selección, la forma de presentar los estímulos o qué tipo de estímulos son presentados, la opción de apagar o encender el sistema, la posibilidad de corregir las selecciones incorrectas, o el uso de predictor de texto. Todos estos parámetros deben ser seleccionados considerando quién controlará el sistema y para qué será utilizado.

1.2.3. Interfaz gráfica

El funcionamiento de una interfaz gráfica de una ERP-BCI visual se basa en el paradigma *oddball*. Este paradigma, en su adaptación a una BCI, consiste en la presentación de diversos estímulos visuales – generalmente, en una pantalla de ordenador – entre los cuales el usuario debe atender a uno de ellos de forma específica (estímulo *target*). Esta tarea de atención consiste en percibir cuándo aparece el estímulo deseado (*target*), y suele ser apoyada a través de una tarea cognitiva que consiste en contar mentalmente el número de veces que aparece dicho estímulo. La visualización del estímulo *target* provocará la aparición de determinados ERP. De esta manera, el sistema deberá seleccionar aquel comando que se encuentre asociado al estímulo visual que ha evocado el ERP.

Existen numerosos tipos de paradigmas visuales, basados en el *oddball*, que pueden ser utilizados para el control de una ERP-BCI visual. Estos paradigmas variarán en la forma de presentar los estímulos que pueden ser seleccionados por el usuario. A continuación, se expondrán los dos paradigmas en los que más se ha fundamentado la literatura previa para el control de una ERP-BCI visual: el paradigma basado en la presentación visual serial rápida (*rapid serial visual presentation*, RSVP) y el paradigma de filas y columnas (*row-column paradigm*, RCP).

a. Presentación visual serial rápida

El paradigma basado en la RSVP es comúnmente utilizado en neurociencias para el estudio y evocación de los ERP (Potter, 2018). Este paradigma de presentación consiste en la exposición secuencial y pseudoaleatoria de cada uno de los posibles estímulos en la misma localización espacial² (figura 4). La tarea suele consistir en que el participante atienda a la aparición de alguno de esos estímulos, siendo éste el *target*, e ignore el resto, los *non-target*. A pesar de la amplia utilización de este paradigma en neurociencias, fue adaptado por primera vez a una ERP-BCI visual por Acqualagna et al. (2010). En el caso de un *speller*, el estímulo *target* es la presentación de la letra deseada, mientras los estímulos *non-target* son el resto de las letras. La característica más relevante de estos sistemas es que, debido a que los estímulos se presentan en la misma localización espacial, el usuario no necesita control ocular para su manejo.

b. Paradigma de filas y columnas

El RCP consiste en la presentación pseudoaleatoria de los estímulos, sobre una matriz de letras, de forma simultánea con todos aquellos pertenecientes a su misma fila o columna (figura 5). De esta manera, el estímulo *target* será *presentado* de forma concurrente junto con aquellos estímulos *non-target* con los que comparte fila o columna. Para seleccionar el estímulo deseado (estímulo *target*), el sistema debe determinar qué fila y qué columna se relaciona con la presencia del

² No es completamente necesario que la localización de los estímulos sea exactamente la misma, ya que hay trabajos que han sido englobados dentro del paradigma RSVP presentando ligeras variaciones en la localización de los estímulos (p. ej., Won et al. (2018)).

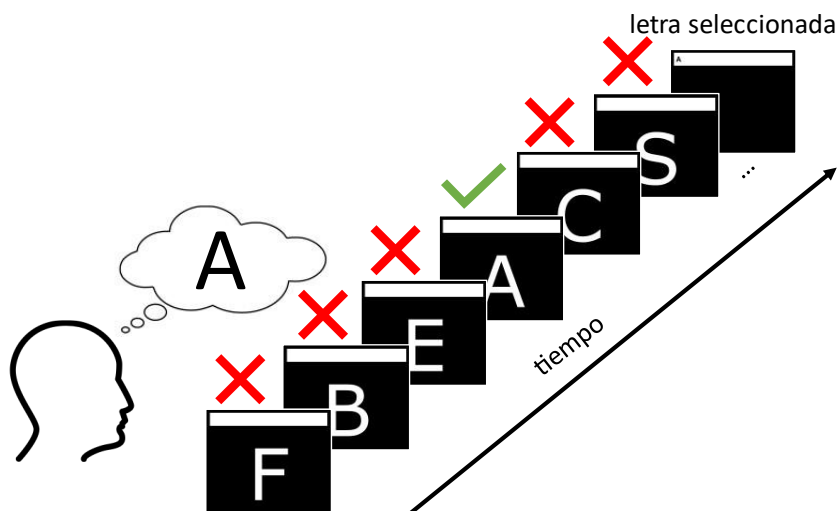


Figura 4. Funcionamiento esquemático de la presentación visual serial rápida (*rapid serial visual presentation*, RSVP) adaptada a una interfaz cerebro ordenador, basada en los potenciales relacionados con eventos visuales, que permita la selección de letras. En el ejemplo expuesto, el usuario desea seleccionar la letra A, por tanto, deberá atender a la aparición de dicha letra para que el sistema, finalmente, la seleccione.

ERP. Este paradigma fue presentado por primera vez por Farwell y Donchin (1988) y consistía en una matriz 6×6 compuesta por 26 letras (a-z, en el alfabeto inglés) y 10 números (0-9). A diferencia del paradigma basado en la RSVP, donde se presentan los estímulos en la interfaz de forma individual y en serie, en el RCP todos los elementos están previamente dispuestos en la pantalla formando la matriz. En el RCP, lo que debe ser atendido por el usuario es la aparición de un estímulo sobre el elemento de la matriz que éste desea seleccionar. Por ejemplo, en el *speller* presentado por Farwell y Donchin (1988), el estímulo *target* consistía en una iluminación a blanco de la letra, junto con aquellas con las que comparte fila o columna, que el usuario deseaba seleccionar, la cual estaba previamente en gris en la matriz. El resto de las iluminaciones de aquellas letras que el usuario no deseaba seleccionar eran los estímulos *non-target*. Una de las principales ventajas del RCP, en comparación a un paradigma de RSVP, es su eficiencia a la hora de presentar los estímulos ya que, al iluminar varios elementos de forma simultánea, requiere menos tiempo para la

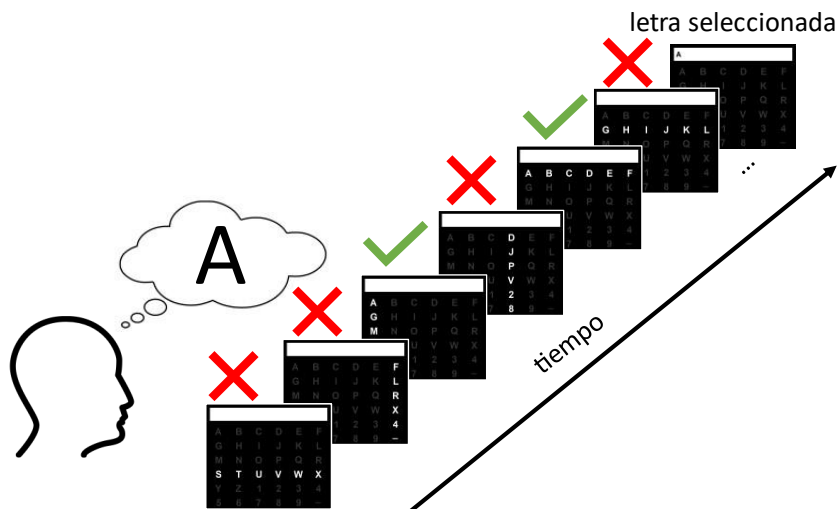


Figura 5. Funcionamiento esquemático del paradigma de filas y columnas (*row-column paradigm*, RCP) adaptado a una interfaz cerebro ordenador, basada en los potenciales relacionados con eventos visuales, que permita la selección de letras. En el ejemplo expuesto, el usuario desea seleccionar la letra A, por tanto, deberá atender a la iluminación de la fila o columna que contenga dicha letra para que el sistema, finalmente, la seleccione.

presentación de todos ellos. Por ejemplo, para poder presentar 36 estímulos en el paradigma basado en la RSVP, se requerirían, al menos, 36 presentaciones de estímulos (una presentación por cada estímulo), mientras que en el RCP sólo se necesitarían 12 presentaciones (6 iluminaciones de filas y otras 6 de columnas). Además, por lo general, los sistemas basados en el RCP ofrecen un rendimiento superior a los basados en la RSVP (Ahani et al., 2018; Fernández-Rodríguez, Medina-Juliá, et al., 2019). Sin embargo, en caso de no tener control oculomotor, el rendimiento del RCP se ve negativamente afectado, siendo uno de sus principales inconvenientes (Brunner et al., 2010; Treder y Blankertz, 2010).

Además del paradigma de presentación empleado, otro factor relevante de las ERP-BCI visuales es el tipo de estímulo utilizado para evocar los ERP. En un *speller*, el tipo de estímulo más habitual para evocar los ERP ha sido el de las propias letras. Sin embargo, otros trabajos han optado por la utilización de estímulos alternativos, tales como caras o figuras geométricas (Kaufmann et

al., 2011; Ma y Qiu, 2017). El tipo de estímulo visual empleado por la interfaz puede afectar al rendimiento y a la experiencia del usuario en el control de una ERP-BCI (p. ej., Takano et al. (2009), S. Li et al. (2020) y Z. Lu et al. (2020)). Debido a que el estudio de los estímulos en una ERP-BCI visual es el tema central de la tesis, estas aportaciones serán desarrolladas en una sección posterior (sección 1.3).

Además de los parámetros gráficos de una ERP-BCI visual, como son el paradigma de presentación y los estímulos, también han sido previamente estudiados los parámetros temporales. Los tiempos de presentación más importantes que deben ser detallados en el funcionamiento de una ERP-BCI visual son: (a) duración del estímulo, el tiempo durante el cual será presentado cada estímulo; (b) intervalo entre estímulos (*interstimulus interval*, ISI), el tiempo que transcurre entre la desaparición de un estímulo y la presentación del siguiente; y (c) asincronía del inicio del estímulo (*stimulus onset asynchrony*, SOA), el tiempo que transcurre entre la presentación de dos estímulos consecutivos (este tiempo debe ser igual a la suma de la duración del estímulo y el ISI). Como ocurría con los parámetros relativos al paradigma de presentación y los estímulos, estos parámetros han mostrado ser relevantes en el rendimiento de una ERP-BCI, por tanto, deben ser cuidadosamente considerados (M. Li et al., 2021; Y. Li et al., 2014; J. Lu et al., 2013).

1.2.4. Protocolo experimental

Tras preparar la instrumentación para el registro de la señal EEG, el investigador debe asegurarse de que la tarea experimental es comprendida por el participante. Además, es conveniente que este último siga unas indicaciones para que la señal EEG sea registrada adecuadamente. Estas directrices van principalmente dirigidas a la minimización de artefactos ajenos a la propia señal EEG, especialmente los musculares (p. ej., apretar la mandíbula o recolocarse en la silla). Además, cuando comience la tarea experimental, la instrucción que debe seguir el participante es la de focalizar su atención en uno de los estímulos visuales presentados en la pantalla (estímulo *target*) y, por lo general, contar el número de veces que éste aparece. El conjunto formado por la presentación de cada uno de los estímulos disponibles en la interfaz será denominado secuencia. Por ejemplo, en una interfaz de 36 elementos, una secuencia estaría formada por 36 presentaciones en un paradigma basado en la RSVP, y 12 en un RCP usando una matriz 6×6 . Normalmente, una única presentación de cada estímulo – es decir, una

secuencia – no suele ser suficiente para que el sistema sea capaz de identificar correctamente el ERP asociado al estímulo *target*. Por tanto, es habitual que el sistema emplee varias secuencias para realizar dicha selección. La duración de cada secuencia dependerá del número de estímulos que presente la interfaz, y de los tiempos de presentación (duración del estímulo, ISI y SOA).

Para establecer el control de una ERP-BCI es habitual que el sistema requiera dos fases, la fase de calibración y la fase *online*. A continuación, se detallará en qué consiste cada fase.

a. Fase de calibración

Debido a la gran variabilidad de la señal EEG entre los usuarios, es preciso entrenar el sistema para que aprenda a discriminar entre estímulos *target* y *non-target* en base a la señal EEG del usuario que va a controlar el dispositivo. Para ello, es necesario aplicar una fase de calibración. Durante esta fase, lo único que debe hacer el usuario es enfocar su atención en los estímulos visuales que el sistema le indique, los cuales serán previamente definidos por el personal investigador. Debido a que el sistema aún no conoce los parámetros del usuario, no es posible ofrecer *feedback* hasta que esta fase finalice y se obtengan dichos parámetros. El número de secuencias utilizadas en esta tarea debe ser lo suficientemente amplio para garantizar que el sistema sea capaz de obtener los parámetros que permitan discriminar entre las señales asociadas a los estímulos *target* y *non-target*.

b. Fase *online*

Una vez que el clasificador ha sido entrenado para identificar la señal asociada al estímulo *target*, el usuario podrá realizar la fase *online*. En esta fase, la persona que controle la interfaz será capaz de seleccionar libremente el comando que desee a través de su atención al estímulo asociado (p. ej., atender a la letra “a” para escribir dicha letra). Por tanto, durante esta fase ya se podrá hablar de un control real del sistema por parte del usuario, quien podrá recibir *feedback* de su desempeño.

A pesar de lo expuesto, es cierto que hay sistemas que prescinden de este esquema de fase de calibración y *online*. Estos sistemas empiezan aplicando un modelo genérico y realizan una calibración *online* adaptativa, es decir, una

calibración que se va adaptando a medida que el usuario maneja la interfaz (p. ej., Jin et al. (2013)). No obstante, este tipo de metodología no es empleada por los trabajos que avalan la presente tesis doctoral, por lo que no será abordada.

1.2.5. Evaluación

En este apartado se presentarán las métricas más comúnmente utilizadas para evaluar el control de una ERP-BCI visual. Estas métricas pueden ser resumidas en tres dimensiones generales: (a) rendimiento, (b) señal EEG, y (c) medidas subjetivas.

a. Rendimiento

La dimensión de métricas relativas al rendimiento tiene como finalidad evaluar de forma objetiva el desempeño del sistema a la hora de seleccionar los elementos de la interfaz. Las medidas más utilizadas y reportadas en los artículos sobre una ERP-BCI visual con relación a esta dimensión son la *accuracy* y la velocidad de transferencia de información (*information transfer rate*, ITR), por lo que serán detalladas a continuación:

- *Accuracy*. La *accuracy* (A) representa la proporción de selecciones correctamente realizadas (SC) con respecto al total de las selecciones realizadas (TS):

$$A = \frac{SC}{TS}$$

- ITR. La ITR es el número de bits transmitidos por unidad de tiempo (Wolpaw et al., 1998). Esta métrica permite establecer una medida objetiva que considera, además de la *accuracy* (A), el número de elementos disponibles en la interfaz (N) y el tiempo necesario para realizar una selección (T):

$$ITR = \frac{\log_2 N + A \log_2 A + (1 - A) \log_2 \frac{1 - A}{N - 1}}{T}$$

Otros artículos optan por añadir medidas más absolutas tales como el número de selecciones correctas e incorrectas, el tiempo empleado para realizar la tarea o el número de comandos correctos por minuto. Sin embargo, la ventaja de medidas más relativas, como la *accuracy* o la ITR, es que permiten tener una visión general más acertada de cómo ha sido el rendimiento del dispositivo, especialmente, cuando se comparen diferentes condiciones experimentales.

La *accuracy* es, sin duda, la variable más reportada por los trabajos relativos a las ERP-BCI visuales. Ésta permite ofrecer una rápida interpretación de cómo ha sido el rendimiento del usuario controlando el sistema, y será la que nos indique su nivel de efectividad. De acuerdo a Kübler et al. (2001), el umbral mínimo de *accuracy* de una BCI diseñada para la comunicación se encuentra en el 70%. Sin embargo, esta variable no considera el tiempo invertido para realizar cada selección. Ésta es una de las ventajas de la ITR, la cual considera factores como el tiempo de selección y el número de estímulos (comandos) disponibles. Por tanto, gracias a la ITR, es posible comparar el rendimiento de propuestas de diferentes trabajos de forma más justa que con el uso de la *accuracy*.

Existen otras medidas derivadas de la ITR que también son utilizadas por algunos trabajos para solventar determinados problemas de esta métrica bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, cuando el sistema requiere varias selecciones para escoger un comando, o cuando la interfaz permite corregir los errores, la ITR puede no reflejar de forma correcta el rendimiento del sistema (Speier et al., 2013). No obstante, se incide en que la ITR es, a pesar de estas posibles incorrecciones, una medida adecuada de eficiencia ya que es la más empleada por la literatura y permite una comparación suficientemente justa entre propuestas de diferentes trabajos.

b. Señal electroencefalográfica

Esta dimensión tendrá como objetivo describir y evaluar los cambios que se dan en la señal EEG del participante durante la aparición de los estímulos visuales en la tarea experimental. Para ello, pueden ser realizados numerosos tipos de análisis, así como estudiarse gran variedad de ERP (p. ej., P1, N1, N170, P2, P300, N400 o P600). No obstante, en el caso de las ERP-BCI visuales, el análisis más común es

el relativo al estudio de la amplitud (μV) de los diferentes ERP. Estos análisis pueden ser utilizados para, por ejemplo, comparar los niveles de amplitud entre los diferentes tipos de estímulos (*target* frente a *non-target*) o entre las diferentes condiciones del experimento para un mismo tipo de estímulo. Para llevar a cabo la comparación de los niveles de amplitud, los análisis más empleados son (a) los relativos a la línea temporal y (b) los topográficos (figura 6). Por un lado, los análisis en la línea temporal consisten en mostrar la evolución de la amplitud de la señal EEG a lo largo del tiempo en una determinada localización espacial. Por otro lado, los análisis topográficos consisten en un mapeado de los niveles de amplitud de la corteza cerebral en un determinado instante o intervalo temporal. Entre estos dos análisis, el más utilizado en la literatura concerniente a las ERP-BCI visuales es el análisis de la línea temporal.

En el análisis relativo al dominio temporal (figura 6A), la forma más común de seleccionar los intervalos de tiempo para analizar un determinado componente entre condiciones es (a) basarse en la literatura previa, (b) realizar una inspección visual de las formas de onda de los ERP obtenidos y elegir los intervalos en base a lo

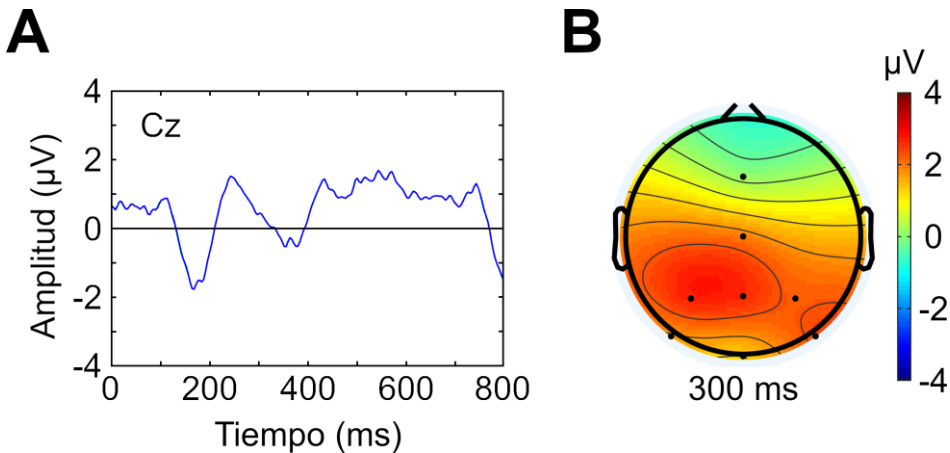


Figura 6. Ejemplos de análisis de la actividad electroencefalográfica para los estímulos *target*. (A) Análisis de la forma de onda el canal Cz en el intervalo temporal 0-800 ms tras la aparición del estímulo *target*. (B) Análisis topográfico en los canales Fz, Cz, Pz y Oz, P3, P4, PO7 y PO8 a los 300 ms tras la aparición del estímulo *target*.

observado, o (c) realizar un análisis entre pequeños segmentos temporales (p. ej., cada 10 ms) en un intervalo amplio (p. ej., de 0 a 800 ms). Cada método tiene sus ventajas e inconvenientes. En primer lugar, la selección basada en la literatura previa puede dar lugar a que la forma de onda obtenida en el experimento no sea exactamente igual a la de los trabajos que han sido usados como referencia. En segundo lugar, si se escoge el análisis en base a la forma de onda los ERP obtenidos, aunque se maximicen las posibilidades de encontrar diferencias significativas, se podría estar cometiendo *double dipping* (el uso del mismo conjunto de datos para la selección del intervalo a analizar y para ejecutar dichos análisis definitivos), una práctica altamente cuestionada en neurociencias (Kriegeskorte et al., 2009). Finalmente, en el análisis segmento a segmento, existe el inconveniente de tener que corregir la posibilidad de obtener falsos positivos, por lo que se deberá aplicar un método de corrección que, indirectamente, también dificultará la presencia de posibles resultados significativos (Luck y Gaspelin, 2017). Todos estos análisis tienen en común que comparan las amplitudes en los mismos intervalos temporales entre condiciones. Sin embargo, también hay trabajos que comparan los picos (punto de máxima amplitud) de los ERP objetivos. Este análisis no es recomendado, salvo en situaciones muy específicas, ya que el nivel de amplitud en un instante no tiene por qué ser necesariamente descriptivo de lo que ocurre en dicho ERP (Luck, 2014b).

A pesar de su uso menos frecuente, el análisis topográfico (figura 6B) también es una importante herramienta para el estudio de los diferentes componentes de interés en una ERP-BCI visual. Gracias a este análisis, es posible conocer la distribución espacial de un determinado componente en el instante o intervalo temporal previamente seleccionado. El instante o intervalo por analizar puede ser seleccionado a través de (a) la literatura previa o (b) el estudio específico de los resultados obtenidos. Las ventajas e inconvenientes de cada método son similares a las del análisis anterior, por lo que la selección de un método u otro deberá realizarse de forma justificada.

Además del estudio de los ERP directamente involucrados en el control de la ERP-BCI visual (p. ej., el P300), también puede aprovecharse el hecho de que se está utilizando la técnica de la electroencefalografía para registrar otras medidas que puedan ayudar a

describir mejor la experiencia del usuario durante el control del sistema. Por ejemplo, puede ser interesante usar la señal EEG para medir factores como la carga de trabajo durante el control del sistema, o el nivel de atención o vigilancia durante la prueba (Das Chakladar et al., 2020).

Debe ser considerado que el sistema utilizará la señal EEG para obtener el rendimiento. Por tanto, debe existir una relación entre la señal EEG y el rendimiento obtenido. Uno de los principales motivos para evaluar la señal EEG es que permite profundizar en la casusa de por qué el rendimiento puede ser diferente tras la manipulación experimental de un factor objeto de estudio. Si hay cambios en el rendimiento, también tiene que haber cambios en la señal EEG; aunque lo opuesto no siempre es cierto, un cambio en la señal EEG no tiene por qué implicar una variación en el rendimiento.

A pesar de que es importante tener un mínimo de conocimientos técnicos sobre el análisis de la señal EEG, es conveniente el uso de herramientas de *software* especializadas y con un buen soporte o comunidad detrás que la respalde. Algunos de los *softwares* empleados para la visualización y análisis de la señal EEG son: EEGLAB (Delorme y Makeig, 2004), Brainstorm (Tadel et al., 2011) o MNE-Python (Gramfort et al., 2013).

c. Medidas subjetivas

La dimensión de las medidas subjetivas tiene como objetivo recoger la experiencia del usuario relacionada con el control de la ERP-BCI. Estas métricas pueden recurrir al uso de medidas ampliamente utilizadas o a propias del estudio específico (*ad hoc*).

Dos de los cuestionarios más utilizados en la evaluación subjetiva de la experiencia del usuario son el System Usability Scale y el NASA-TLX (Brooke, 1996; Hart, 2006). No obstante, lo habitual suele ser el empleo de cuestiones *ad hoc* usando escalas tipo Likert o escalas analógicas visuales (Likert, 1932; Reips y Funke, 2008). Estas cuestiones *ad hoc* suelen hacer referencia a variables como el nivel de fatiga sentido durante la prueba, la facilidad con la que el usuario ha podido controlar el dispositivo, la necesidad de personal técnico o si volvería a usar el sistema.

Estas medidas subjetivas son importantes porque uno de los objetivos de las BCI es que puedan ser utilizadas en entornos reales y de manera prolongada. Por tanto, debe buscarse que la experiencia del usuario sea lo más agradable y cómoda posible, y que invite al participante a seguir utilizando el sistema en su entorno habitual. Esto implica que los estudios realizados no deben ir exclusivamente encaminados a mejorar el rendimiento, sino también la experiencia general del usuario durante el control del sistema. Para conseguir este objetivo, y equiparar la importancia de las dimensiones de medida, en los últimos años se ha ido utilizando cada vez más el enfoque de la usabilidad (Bevan et al., 2016), el cual, además de la eficacia y eficiencia del sistema, incluye la subdimensión de la satisfacción (p. ej., Zickler et al. (2013), Pasqualotto et al. (2015), Guy et al. (2018) y Ron-Angevin et al. (2019)).

1.3. Antecedentes relacionados

La presente tesis doctoral quedará centrada en el uso de una ERP-BCI basada en la modalidad visual. Estos sistemas han sido ampliamente investigados, siendo algunos ejemplos de estudio los paradigmas de presentación (p. ej., Townsend et al. (2010) y Treder et al. (2011)), los tiempos relativos a los estímulos (p. ej., J. Lu et al. (2013) y M. Li et al. (2021)), los tamaños de los estímulos (p. ej., Kellicut-Jones y Sellers (2018) y Y. Li et al. (2011)) o los tipos de estímulos presentados (p. ej., Ma y Qiu (2017) y Kaufmann et al. (2011)). A pesar de que el primer *speller* controlado a través de una BCI fue presentado a finales de los años 80 (Farwell y Donchin, 1988), este campo de investigación relativo a las propiedades visuales de la interfaz no ha dejado de crecer. Esto puede ser debido, posiblemente, gracias al trabajo de equipos interdisciplinarios, con la colaboración de expertos en el campo de la ingeniería, la neurociencia, la psicología o la interacción persona-máquina (Allison et al., 2020).

Como se explicó en la sección relativa a la interfaz gráfica de una ERP-BCI visual (sección 1.2.3), el paradigma de presentación y los estímulos empleados son dos de los factores más importantes a la hora de configurar una ERP-BCI visual. La presente tesis doctoral tiene como objetivo el estudio del segundo factor, los estímulos. Los estímulos son aquellos elementos de la interfaz que deberán ser atendidos por el usuario para que el sistema ejecute un determinado comando. La forma de onda de los ERP puede verse afectada

por el tipo de estímulo empleado (Wang et al., 2012). Por tanto, resulta conveniente utilizar esta capacidad de modulación de los estímulos visuales sobre los ERP para facilitar la discriminación entre elementos *target* frente a *non-target* y, por tanto, mejorar el rendimiento de una ERP-BCI visual.

Los estímulos visuales más utilizados en un *speller* controlado a través de una ERP-BCI visual son las letras blancas (Rezeika et al., 2018). Sin embargo, otros paradigmas han utilizado distintos estímulos visuales, tales como figuras geométricas, pictogramas o caras (Inada y Tanaka, 2011; Kaufmann et al., 2011; Ma y Qiu, 2017). Actualmente, las caras son uno de los estímulos más empleados debido a su alto rendimiento. Estos estímulos han sido puestos a prueba con diferentes variaciones: la cara de un famoso en verde (Q. Li et al., 2015), la cara del propio participante (Z. Lu et al., 2020) o una cara semitransparente que permitía ver la letra de fondo en la matriz (Cheng et al., 2017). Estos trabajos se apoyan en que el uso de caras como estímulo visual evoca unos ERP específicos. Los potenciales más asociados por la literatura a este procesamiento de caras son el N170 y el N400 (Olivares et al., 2015). Al añadir más variación a la forma de onda de la señal EEG – además del potencial P300 típico de una ERP-BCI – el uso de caras como estímulos visuales podría ayudar a discriminar de forma más efectiva al estímulo *target* frente a los *non-target*. Estas propuestas parecen indicar la importancia de considerar el impacto cognitivo de los estímulos visuales presentados. Gracias a estos estímulos, se puede modular la amplitud de algunos de los ERP y, por tanto, mejorar el rendimiento a la hora de clasificar la señal EEG.

Diversos estudios fuera del ámbito de las BCI han mostrado cómo los estímulos con carga emocional producían un aumento de la amplitud en determinados componentes de la señal EEG, tales como el P300 y el potencial positivo tardío (*late positive potential*, LPP) (ver los trabajos de Olofsson et al. (2008) y Hajcak et al. (2010) para una exhaustiva revisión del tema). Por tanto, en el grupo UMA-BCI se decidió llevar a cabo un estudio preliminar (sólo cuatro participantes y sin análisis estadísticos involucrados) para explorar si la aplicación de un paradigma con estímulos emocionales podría mejorar el rendimiento – en una ERP-BCI visual utilizando el RCP – debido a un aumento de amplitud de los potenciales relacionados con las imágenes³

³ A lo largo de la tesis doctoral será usado el término imagen para referirnos a la representación visual de elementos con entidad física como, por ejemplo, objetos, paisajes o

con carga emocional (Fernández-Rodríguez et al., 2018). Para controlar este posible efecto, dicho trabajo presentó las siguientes condiciones variando el tipo de estímulo utilizado: letras blancas, letras de colores, bloques blancos, bloques de colores, imágenes que no provocasen una respuesta emocional (imágenes neutras), imágenes que provocasen una respuesta emocional positiva intensa (imágenes positivas o agradables) e imágenes que provocasen una respuesta emocional negativa intensa (imágenes negativas o desagradables). Las condiciones de los bloques fueron añadidas para controlar que el efecto beneficioso de las imágenes no se debiera a su mayor tamaño en comparación a la sola iluminación de la letra (Speier et al., 2017); las letras de colores y los bloques de colores fueron añadidos para controlar que el efecto de las imágenes no se debiera a la utilización de una imagen diferente para cada letra (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018); finalmente, las imágenes neutras se añadieron para probar si el efecto de las imágenes emocionales se debía a las propiedades de las mismas para provocar una respuesta emocional, tal y como se había mostrado previamente en la literatura no relacionada con las BCI (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). Los resultados de este trabajo preliminar indicaron que podían establecerse tres niveles según el rendimiento (*accuracy*) obtenido (figura 7): (a) independientemente de su categoría emocional, las imágenes presentaron un mejor rendimiento frente a las letras y los bloques; (b) en general, los bloques presentaron un mejor rendimiento en comparación a las letras (los bloques de colores mostraron un rendimiento ligeramente superior a los blancos); y, finalmente, (c) las letras presentaron el peor rendimiento (el rendimiento de las letras blancas fue ligeramente superior al de las letras de colores).

Este estudio preliminar pareció indicar que el efecto del tamaño del estímulo (imágenes y bloques con un mejor rendimiento en comparación a las letras) y de aplicar un estímulo más complejo en cuanto a significado o composición visual (imágenes con un mejor rendimiento en comparación a los bloques) podrían mejorar el rendimiento de una ERP-BCI visual bajo el RCP. La hipótesis de la heterogeneidad entre estímulos no fue cumplida, ya que la superioridad de letras y bloques de colores frente a letras y bloques blancos no fue consistente. Asimismo, el efecto entre los diferentes tipos de estímulos emocionales tampoco fue totalmente concluyente, ya que se

personas. Los elementos simbólicos como letras o números no quedarían incluidos en este conjunto.

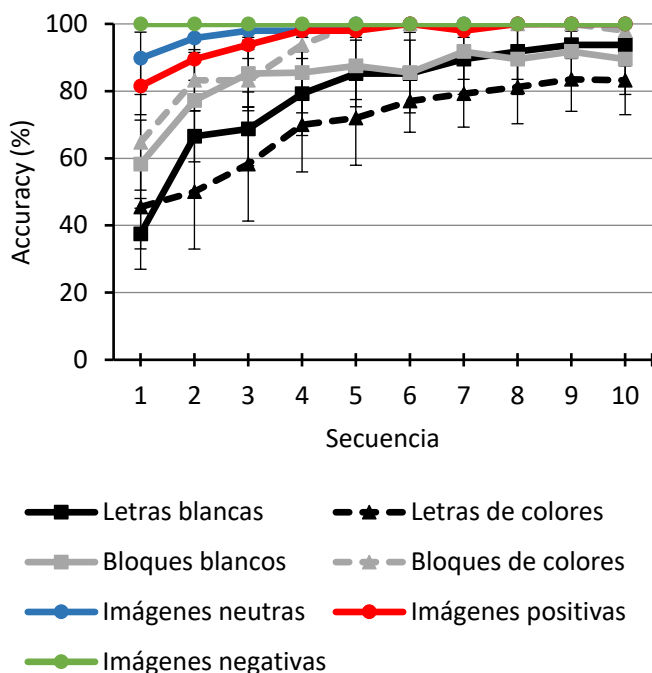


Figura 7. Accuracy (%) (media $\pm$ error estándar) obtenida en cada secuencia por cada una de las condiciones en Fernández-Rodríguez et al. (2018).

advirtió una posible mejora producida por las imágenes negativas, pero no por las positivas, estando las neutras situadas en medio de ambas. Estos resultados podrían indicar que sólo los estímulos emocionales negativos aumentarían el rendimiento, o que las diferencias entre las condiciones con imágenes fueron debidas al azar. En definitiva, debido a los posibles efectos encontrados, se estimó conveniente continuar esta línea de investigación, la cual acabó dando lugar a los cuatro trabajos que avalan la presente tesis doctoral y que se introducen en el siguiente capítulo.

Capítulo 2

Estudios que avalan la tesis doctoral

2.1. Justificación de los trabajos presentados

Como se ha indicado en la sección relativa a los antecedentes relacionados (sección 1.3), el estudio de las características específicas de una interfaz gráfica en el ámbito de las ERP-BCI visuales es un campo de investigación relativamente reciente y fructífero donde aún pueden quedar numerosas propuestas por llevarse a cabo. Por tanto, resulta adecuado que la temática específica de la presente tesis doctoral, dentro de las BCI, sea el estudio de las propiedades visuales de los estímulos en una ERP-BCI visual. Esta tesis doctoral queda avalada por cuatro trabajos publicados en revistas indexadas en el *Journal Citation Reports* (JCR) (Fernández-Rodríguez et al., 2020; Fernández-Rodríguez, Medina-Juliá, et al., 2021; Fernández-Rodríguez, Velasco-Álvarez, et al., 2019b, 2019a). En esta sección se introducirán los mencionados trabajos, presentando para cada uno de ellos su objetivo, las hipótesis principales relativas al rendimiento y la novedad que aportan al ámbito de las ERP-BCI visuales.

La metodología de estos trabajos fue experimental, ya que las variables objeto de estudio fueron controladas, manteniendo constante o aleatorizando el resto de ellas entre las diferentes condiciones. La mayoría de los participantes fueron estudiantes universitarios de entre 18 y 26 años, y se les otorgó una remuneración económica por su colaboración. Los participantes

eran ajenos al campo de las BCI y no conocían las hipótesis de los estudios de forma previa a su participación. Asimismo, todos ellos declararon no tener historial de enfermedad neurológica o psiquiátrica reciente (5 años), ni estar tomando algún tipo de medicación de forma regular.

2.1.1. Estudio 1

El primer estudio tuvo como objetivo evaluar de forma conjunta los efectos de dos factores que fueron previamente reportados por otros trabajos de manera individual. Estos efectos se encontraban relacionados con el tipo de estímulo visual empleado en una ERP-BCI visual: (a) el empleo de la iluminación del estímulo en forma bloque (un rectángulo sólido con la letra en su interior) frente a la iluminación estándar de la letra produce una mejora del rendimiento (Speier et al., 2017); y (b) el uso de una iluminación en diferentes colores (heterogénea), en lugar de una usando siempre los mismos colores (homogénea), también incrementa el rendimiento (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018). Las condiciones empleadas en este estudio utilizaron los siguientes elementos como estímulos visuales: letras blancas, letras de colores, bloques blancos y bloques de colores. La novedad de este trabajo radicó principalmente en el estudio conjunto de ambas variables – la forma de los estímulos y la heterogeneidad de los colores – a través de un diseño multifactorial (2×2).

- Hipótesis 1. El empleo de estímulos en forma de bloque, en comparación a las letras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.
- Hipótesis 2. El empleo de estímulos de diferentes colores (heterogéneos), en comparación al empleo de un único color (homogéneos), incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.
- Hipótesis 3. Ambos factores presentarán un efecto aditivo al rendimiento de una ERP-BCI visual.

2.1.2. Estudio 2

El segundo estudio tuvo como objetivo evaluar la utilización de imágenes emocionales (es decir, aquellas con la capacidad de provocar una respuesta emocional) para mejorar el rendimiento de una ERP-BCI visual. El principal

soporte teórico de esta propuesta vino dado por aquellos estudios previos, fuera del campo de las BCI, que mostraron un incremento en la amplitud de determinados potenciales (p. ej., el P300 o el LPP) debido a la visualización de imágenes emocionales (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). Las condiciones empleadas en el presente estudio utilizaron los siguientes estímulos visuales: letras blancas, imágenes que no provocasen una respuesta emocional (imágenes neutras), imágenes que provocasen una respuesta emocional positiva intensa (imágenes positivas) e imágenes que provocasen una respuesta emocional negativa intensa (imágenes negativas). La novedad de este trabajo radicó en la utilización de tres condiciones experimentales con imágenes con diferente carga emocional (neutra, positiva o negativa) como estímulos en una ERP-BCI visual.

- Hipótesis 1. El uso de imágenes como estímulos, en comparación a las letras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.
- Hipótesis 2. El uso de imágenes emocionales como estímulos, en comparación a las imágenes neutras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.

2.1.3. Estudio 3

El tercer estudio tuvo como objetivo evaluar si la mejora del rendimiento producida por el uso de imágenes bajo el RCP en el estudio 2 era también hallada bajo la RSVP. Debido a los adecuados resultados obtenidos en el estudio 2 – es decir, el buen rendimiento de las imágenes como estímulos en una ERP-BCI visual – se decidió llevar a cabo un estudio preliminar que comparara el efecto de mejora de las imágenes en el RCP frente a un paradigma que no requiriera del control ocular, concretamente, en la RSVP (Fernández-Rodríguez, Medina-Juliá, et al., 2019). Dicho trabajo confirmó que las imágenes mejoraban el rendimiento bajo el RCP, pero no bajo la RSVP. Por tanto, se estimó oportuno llevar a cabo el estudio 3 para que evaluara esta posible diferencia entre paradigmas de manera más exhaustiva (p. ej., una muestra mayor, un análisis más detallado de los resultados, una interfaz que permitiera un mayor número de comandos e inclusión de una fase *online*). Los factores objeto de estudio de este trabajo fueron el paradigma de presentación (RCP y RSVP) y el tipo de estímulos visuales (letras e imágenes). Para estudiar estos factores, las condiciones empleadas fueron las siguientes: letras bajo la RSVP, imágenes bajo la RSVP, letras bajo el RCP e

imágenes bajo el RCP. La novedad de este trabajo radicó, principalmente, en el estudio conjunto del efecto de las imágenes bajo el RCP y la RSVP a través de un diseño multifactorial (2×2).

- Hipótesis 1. El RCP presentará un rendimiento superior a la RSVP.
- Hipótesis 2. El efecto de mejora producido por el uso de imágenes será mayor en RCP en comparación al producido en la RSVP (efecto de interacción entre el paradigma de presentación y los estímulos).

2.1.4. Estudio 4

El cuarto estudio tuvo como objetivo evaluar si la distancia entre los estímulos presentados en una ERP-BCI visual podría afectar a su rendimiento. En el estudio 3 se mostró que el rendimiento de un paradigma basado en la RSVP no se beneficiaba de igual manera que el RCP por el uso de imágenes como estímulos. Una de las principales diferencias entre el RCP y la RSVP es la distancia existente entre los distintos estímulos de la interfaz. En Won et al. (2018) se mostró que un paradigma similar a la RSVP, con los estímulos ligeramente desplazados del centro, presentaba un mejor rendimiento frente a una condición que empleara la RSVP clásica con los estímulos visuales colocados todos en la misma posición. En la condición con los estímulos ligeramente separados, el nivel de separación entre los estímulos fue tan pequeño que requería cierto nivel de solapamiento entre ellos. Por tanto, se estimó adecuado llevar a cabo un nuevo estudio que probara condiciones con diferentes niveles de solapamiento entre los estímulos (100%, 66.67%, 33.33% y 0%) para explorar cómo podía quedar afectado el rendimiento de una ERP-BCI visual basada en la RSVP. La novedad de este trabajo radicó en (a) estudiar de forma controlada el nivel de solapamiento y (b) ofrecer una explicación – basada en los análisis de la señal EEG – a por qué dicho solapamiento afectaba al rendimiento de una ERP-BCI visual.

- Hipótesis 1. Un mayor nivel de solapamiento entre los estímulos de una ERP-BCI visual producirá un empeoramiento del rendimiento.

2.2. Publicación de los trabajos presentados

Los estudios llevados a cabo para la presente tesis doctoral fueron publicados en revistas internacionales, relativas a las áreas de neurociencia, neuroingeniería y bioingeniería, las cuales acogen los trabajos relacionados con el estudio de las BCI. Estas publicaciones fueron realizadas entre 2019 y 2021, y cabe destacar que el orden de exposición en la presente tesis doctoral no corresponde con el orden cronológico de publicación. Esto es debido a que el estudio 3 fue llevado a cabo antes que el 4, a pesar de que su publicación fuera posterior. A continuación, se presentarán cada una de estas publicaciones con el título del estudio, el resumen original y la referencia.

2.2.1. Estudio 1

Evaluation of flashing stimuli shape and colour heterogeneity using a P300 brain-computer interface speller

Previous works using a visual P300-based speller have reported an improvement modifying the shape or colour of the presented stimulus. However, the effects of both blended factors have not been yet studied. Thus, the aim of the present work was to study both factors and assess the interaction between them. Fifteen naïve participants tested four different spellers in a calibration and online task. All spellers were similar except the employed illumination of the target stimulus: white letters, white blocks, coloured letters, and coloured blocks. Regarding the results, the block-shaped conditions offered an improvement versus the letter-shaped conditions in the calibration (accuracy) and online (accuracy and correct commands per minute) tasks. The analysis of the event-related potential waveforms showed a larger difference between target and no target stimuli waveforms for the block-shaped conditions versus the letter-shaped. The hypothesis regarding the colour heterogeneity of the stimuli was not found at any level of the analysis. Therefore, this first study combining block-shaped and colour factors, and offering an exhaustive evaluation of both, demonstrated the superiority of block-shaped illumination versus the standard letter-shaped flashing stimuli in classification performance.

Fernández-Rodríguez, Álvaro, Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., y Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of flashing stimuli shape and colour

heterogeneity using a P300 brain-computer interface speller. *Neuroscience Letters*, 134385. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134385>

2.2.2. Estudio 2

Evaluation of emotional and neutral pictures as flashing stimuli using a P300 brain-computer interface speller

Previous works have reported that complex emotional and visual stimuli can increase the amplitude of the P300 brain potential. Thus, the aim of the present work is to assess these kinds of images in a P300 brain-computer interface (BCI) speller as flashing stimuli. Twenty-three volunteers controlled four spellers with different sets of flashing stimuli: flashing letters, neutral pictures (NP), emotional pleasant pictures (EPP) and emotional unpleasant pictures (EUP). The sets of pictures showed a higher performance than the letters in accuracy and information transfer rate. These results were supported by the analysis of the P300 signal, where the picture sets offered the greatest amplitudes. The NP and EPP sets were the best evaluated in the subjective questionnaire. In short, despite the fact that the effect of emotional stimuli could not be observed in the performance metrics, picture sets have offered a high performance and should be considered in future proposals for visual P300-based BCI applications.

Fernández-Rodríguez, Ávaro, Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., y Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of emotional and neutral pictures as flashing stimuli using a P300 brain-computer interface speller. *Journal of Neural Engineering*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab386d>

2.2.3. Estudio 3

Different effects of using pictures as stimuli in a P300 brain-computer interface under rapid serial visual presentation or row-column

Previous proposals for controlling a P300-based BCI speller have shown an improvement using alternative images instead of letters as target stimuli under a row-column paradigm (RCP). However, the RCP is not suitable for those patients with a lack of gaze control. To solve that, the rapid serial visual presentation (RSVP) paradigm has been proposed in previous studies. The aim of the present work is to assess if a set of alternative pictures that

improved performance in RCP could also improve performance in RSVP. Sixteen participants controlled four conditions in calibration and online tasks: letters in RCP, pictures in RCP, letters in RSVP and pictures in RSVP. The effect given by pictures was greater under RCP than under RSVP, both for performance and event-related potential analyses. Indeed, pictures did not show any improvement under RSVP in comparison to letters. In addition, the condition with pictures under RCP was declared the favourite by most users (68.75%), while the condition with pictures under RSVP was not chosen as favourite by any participant. Therefore, this work shows that the improvement related to the use of pictures as alternative flashing stimuli under RCP may not be transferred to RSVP.

Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., y Ron-Angevin, R. (2021). Different effects of using pictures as stimuli in a P300 brain-computer interface under rapid serial visual presentation or row-column paradigm. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59(4), 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02340-y>

2.2.4. Estudio 4

Effects of spatial stimulus overlap in a visual P300-based brain-computer interface

The rapid serial visual presentation (RSVP) paradigm seems to be one of the most appropriate for patients using P300-based brain-computer interface applications, since non-ocular movements are required. However, according to previous works, the use of different locations for each stimulus may improve performance. Thus, the aim of the present work is to explore how spatial overlap between stimuli influences performance in controlling a visual P300-based BCI. Nineteen participants were tested using four levels of overlap between two stimuli: 100%, 66.7%, 33.3% and 0%. Significant differences in accuracy were found between the 0% overlapped condition and all the other conditions, and between 33.3% and higher overlap (66.7% and 100%). These results can be explained due to a modulation in the non-target stimulus amplitude signal caused by the overlapping factor. In short, the stimulus overlap provokes a modulation in performance using a P300-based BCI; this should be considered in future BCI proposals in which an optimal surface exploitation is convenient and potential users have only residual ocular movement.

Fernández-Rodríguez, Álvaro, Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., y Ron-Angevin, R. (2020). Effects of spatial stimulus overlap in a visual P300-based brain-computer interface. *Neuroscience*, 431, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.02.011>

Capítulo 3

Resumen global de resultados

3.1. Estudio 1

Trabajos previos han mostrado que el uso de los estímulos con forma de bloque (Speier et al., 2017) y la utilización de diferentes colores para cada uno de los estímulos de la interfaz (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018) mejoran el rendimiento de una ERP-BCI visual. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue estudiar de manera conjunta el efecto de estos factores.

- Hipótesis 1. El empleo de estímulos en forma de bloque, en comparación a las letras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.
- Hipótesis 2. El empleo de estímulos de diferentes colores (heterogéneos), en comparación al empleo de un único color (homogéneos), incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.
- Hipótesis 3. Ambos factores presentarán un efecto aditivo al rendimiento de una ERP-BCI visual.

Para cumplir el propósito de evaluar de forma individual y conjunta el efecto de los dos factores relativos a los estímulos (la forma y la heterogeneidad de los colores), se llevó a cabo un diseño factorial (2×2) con

cuatro condiciones: letras blancas (LB), letras de colores (LC), bloques blancos (BB) y bloques de colores (BC). Este trabajo utilizó las siguientes dimensiones para la evaluación de los resultados: (a) el rendimiento en las fases de calibración (*accuracy*) y *online* (*accuracy*, tiempo necesario para completar la tarea y *comandos correctos por minuto* (CCPM)); (b) la forma de onda de la señal EEG, tomando como parámetro la *diferencia de amplitud* (μV) en valor absoluto entre estímulos *target* y *non-target* en el intervalo temporal 200-600 ms tras la aparición del estímulo; y (c) variables subjetivas relativas a la percepción subjetiva del rendimiento (*rendimiento*), la dificultad para mantener la atención en la interfaz (*atención*), el esfuerzo mental necesario para controlar el sistema (*esfuerzo mental*), el nivel de comodidad (*comodidad*), el nivel de frustración (*frustración*) y el nivel de satisfacción general con la interfaz (*satisfacción*).

a. Rendimiento

Este trabajo mostró de forma clara un efecto principal relativo a la forma del estímulo, según el cual, la iluminación en bloque (BB y BC) presentaba una mejora del rendimiento en comparación a las letras (LB y LC), tanto en la fase de calibración (*accuracy*) como en la fase *online* (*accuracy*, tiempo y comandos correctos por minuto) (figura 8). Por

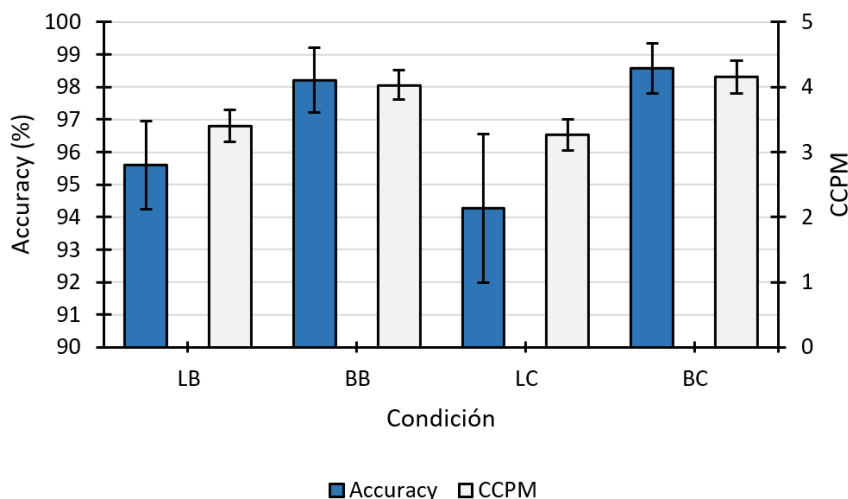


Figura 8. *Accuracy* (%) y comandos correctos por minuto (CCPM) (media $\pm$ error estándar) para cada una de las condiciones del estudio 1 en la fase online.

tanto, el efecto hallado en Speier et al. (2017) quedó satisfactoriamente replicado (confirmación de la hipótesis 1). Sin embargo, el efecto de la heterogeneidad en los colores – previamente reportado en Ryan et al. (2017) y Ryan et al. (2018) – no fue observado en el presente estudio, ya que los estímulos de colores (LC y BC) no presentaron un rendimiento superior a los blancos (LB y BB) (rechazo de la hipótesis 2). Asimismo, debido a que el efecto de la heterogeneidad no fue hallado, no se encontró un efecto aditivo de ambos factores (rechazo de la hipótesis 3).

b. Forma de onda de la señal EEG

Con relación a la señal EEG, el factor de la forma de los estímulos mostró un efecto principal significativo en la variable *diferencia de amplitud* (μV) en el promedio de los canales empleados (figura 9). En concreto, los estímulos con forma de bloque (BB y BC) presentaron una mayor *diferencia de amplitud* en comparación a los estímulos con forma de letras (LB y LC). Asimismo, también se mostró un efecto de

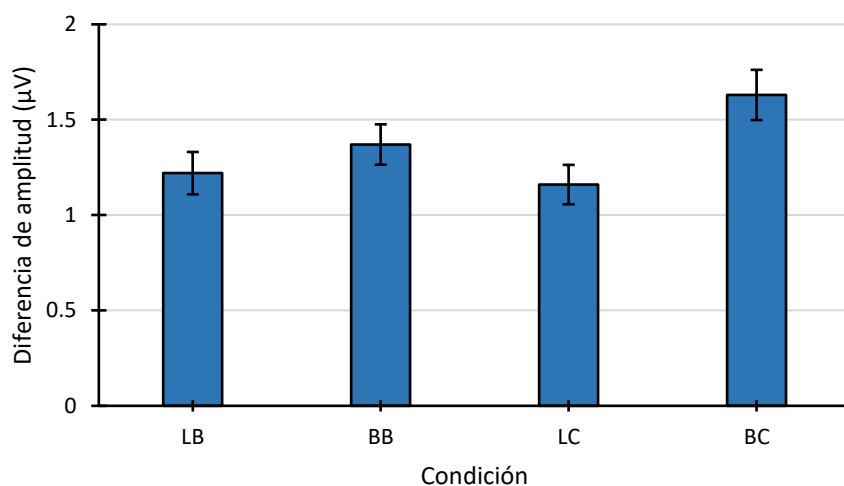


Figura 9. Diferencia de amplitud (μV) (media $\pm$ error estándar) entre los estímulos *target* y *non-target* en el intervalo de 200-600 ms tras la aparición del estímulo para cada una de las condiciones del estudio 1 (letras blancas, LB; bloques blancos, BB; letras de colores, LC; y bloques de colores, BC) en la fase de calibración.

interacción entre los factores relativos a la forma y a la heterogeneidad, por lo que se procedió a comparar entre condiciones específicas. Estas comparaciones mostraron que BC presentó una mayor *diferencia de amplitud* frente a LB y LC, así como BB frente a LC.

c. Medidas subjetivas

Las medidas subjetivas empleadas en el estudio no mostraron ningún efecto principal en los factores relativos a la forma o la heterogeneidad de los estímulos (figura 10). Sin embargo, fue obtenido un efecto de interacción entre ambos factores para las variables *confort* y *satisfacción*. Por tanto, se procedió a comparar las puntuaciones obtenidas para las mencionadas variables entre condiciones específicas. La variable *confort* no mostró diferencias entre alguno de los pares de condiciones. Esta ausencia de significación en las comparaciones múltiples fue debida a la aplicación del método de corrección de Bonferroni, el cual dificulta la presencia de diferencias significativas a

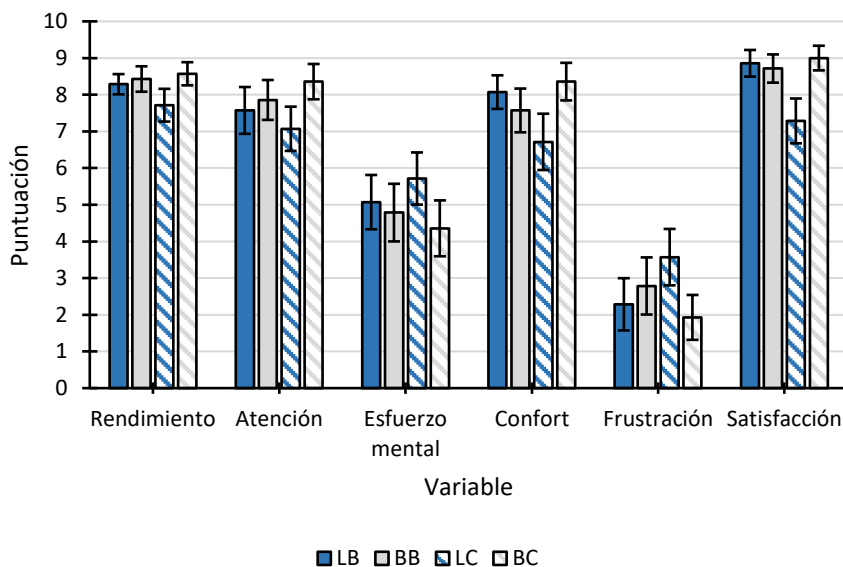


Figura 10. Puntuación (media $\pm$ error estándar) en cada una de las variables subjetivas empleadas para cada condición del estudio 1 (letras blancas, LB; bloques blancos, BB; letras de colores, LC; y bloques de colores, BC).

medida que aumenta el número de comparaciones múltiples. Sin embargo, la variable *satisfacción* mostró que BC obtuvo una puntuación significativamente superior a LC. Resultó especialmente interesante que BC presentara las mejores puntuaciones en todas las variables subjetivas mientras que LC mostrara las peores. Parece que ambas condiciones con estímulos heterogéneos (BC y LC) se encuentran diametralmente opuestas en cuanto a su preferencia por parte de los participantes.

En resumen, el estudio concluye con la confirmación de la hipótesis 1, es decir, los estímulos en forma de bloque mejoran el rendimiento en comparación a las letras. Este efecto ha sido apoyado por los resultados del análisis de la señal EEG, en el cual las condiciones de bloques presentaron las mayores *diferencias de amplitud*, lo que debió facilitar la clasificación entre estímulos *target* y *non-target*. Por otro lado, el efecto de la heterogeneidad de los colores no ha sido replicado, por lo que la hipótesis 2 quedó rechazada. Debido a que el efecto de la heterogeneidad de los colores sí fue mostrado en anteriores trabajos, éste debe ser estudiado más ampliamente con la finalidad de conocer qué otros factores de la interfaz pueden modularlo (p. ej., el paradigma de presentación o número de estímulos). Finalmente, ya que la hipótesis 2 fue rechazada, la hipótesis 3 tampoco pudo ser aceptada, ya que ésta hacía referencia a un efecto aditivo de ambos factores sobre el rendimiento. En definitiva, en este trabajo se puede concluir que el factor relativo a la forma del estímulo ha sido el único que ha ofrecido un efecto de mejora en el rendimiento del sistema.

3.2. Estudio 2

Anteriores trabajos, fuera del ámbito de las BCI, han aportado que las imágenes con la capacidad de provocar una respuesta emocional (imágenes emocionales) pueden aumentar la amplitud de determinados ERP como el P300 y el LPP (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). Por tanto, el objetivo del estudio 2 fue evaluar el uso de este tipo de imágenes emocionales como estímulos en una ERP-BCI visual.

- Hipótesis 1. El uso de imágenes como estímulos, en comparación a las letras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.

- Hipótesis 2. El uso de imágenes emocionales como estímulos, en comparación a las imágenes neutras, incrementará el rendimiento de una ERP-BCI visual.

Para poner a prueba estas hipótesis relativas al rendimiento de una ERP-BCI visual, se evaluaron cuatro condiciones con diferentes estímulos: letras blancas neutras (LN⁴), imágenes neutras (IN, bajo nivel de activación y valencia), imágenes positivas o agradables (IA, alto nivel de activación y valencia positiva), e imágenes negativas o desagradables (ID, alto nivel de activación y valencia negativa). Este trabajo empleó las siguientes dimensiones para la evaluación de los resultados: (a) el rendimiento en las fases de calibración (*accuracy*, *ITR*) y *online* (*accuracy*, *ITR*, *tiempo* necesario para completar la tarea y *comandos correctos por minuto*); (b) la forma de onda de la señal EEG, tomando como parámetro la *diferencia de amplitud* (μV) en la señal EEG entre estímulos *target* y *non-target* en diferentes ERP (P1, N1, P2, N2, P300 y LPP); y (c) variables subjetivas relativas a la percepción subjetiva del rendimiento (*rendimiento*), dificultad para mantener la atención en la interfaz (*atención*), el esfuerzo mental necesario para controlar el sistema (*esfuerzo mental*), el nivel de placer (*placer*), el nivel de frustración (*frustración*) y el nivel de satisfacción general con la interfaz (*satisfacción*).

a. Rendimiento

Tanto la fase de calibración como la fase *online* mostraron resultados similares. Las condiciones que emplearon las imágenes como estímulos (IN, IA e ID) mostraron un rendimiento significativamente superior a las letras, tanto para la *accuracy* como para la *ITR* en ambas tareas (confirmación de la hipótesis 1) (figura 11). Sin embargo, no se hallaron diferencias significativas entre las condiciones IA e ID, es decir, aquellas con imágenes emocionales, frente a IN, aquella con imágenes neutras (rechazo de la hipótesis 2).

b. Forma de onda de la señal EEG

Para este trabajo se optó por realizar un análisis específico de la *diferencia de amplitud* (μV) entre estímulos *target* y *non-target* de cada

⁴ No se han utilizado las siglas LB para no confundir con la condición homónima del estudio 1.

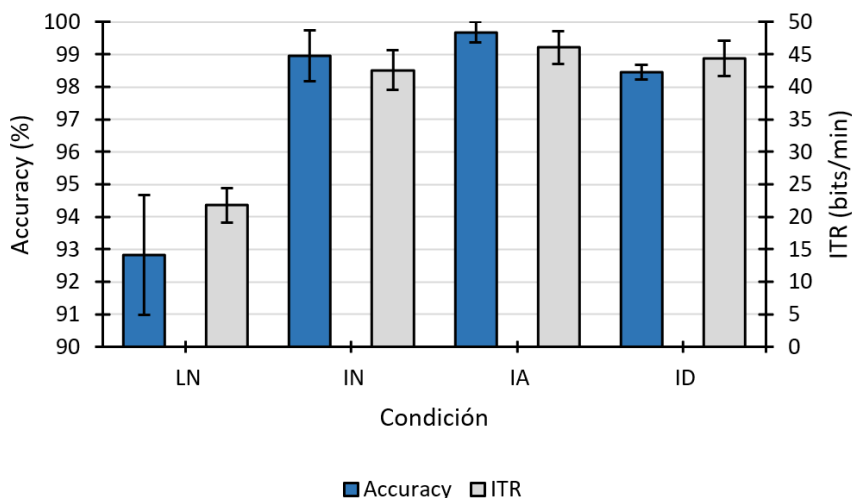


Figura 11. Accuracy (%) y velocidad de transferencia de información (*information transfer rate*, ITR) (media $\pm$ error estándar) para cada una de las condiciones del estudio 2 (letras blancas neutras, LN; imágenes neutras, IN; imágenes positivas o agradables, IA; imágenes negativas o desagradables, ID) en la fase online.

uno de los posibles ERP implicados en base a la literatura previa (P1, N1, P2, N2, P300, LPP) (Garrison et al., 2017). Asimismo, estos análisis temporales fueron divididos en región anterior (Fz y Cz) y posterior (Pz, Cz, Oz, P3, P4, PO7 y PO8). Es importante hacer hincapié en dos aspectos concretos: (a) lo medido son las diferencias de amplitud entre *target* y *non-target*; y (b) el hecho de utilizar unos intervalos temporales – extraídos de la literatura previa – asociados a unos ERP concretos no implica que esos componentes hayan sido localizados en el presente estudio, ya sea en esos intervalos u otros.

En referencia a la región anterior, los análisis mostraron los siguientes resultados significativos. En primer lugar, las condiciones de imágenes emocionales (IA e ID) presentaron unos P1 y N1 más positivos frente a la condición LN (figura 12). En segundo lugar, se mostró un N2 más negativo para las condiciones con imágenes (IN, IA e ID) frente a LN. El P300 fue más negativo en las condiciones con imágenes (IN, IA e ID) que en aquella con letras (LN). Finalmente, el LPP mostró ser significativamente mayor para los estímulos

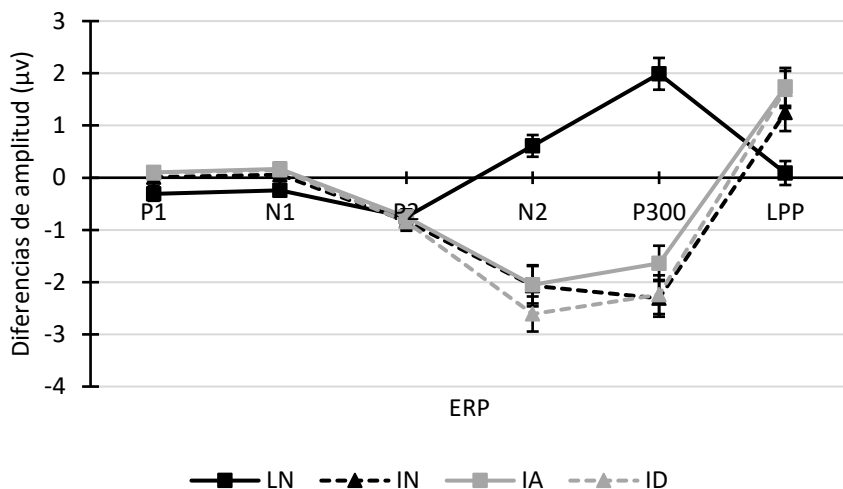


Figura 12. Diferencia de amplitud (media $\pm$ error estándar) en la región anterior (canales Fz y Cz) entre los estímulos *target* y *non-target* para cada potencial relacionado con evento (*event-related potential*, ERP) y condición del estudio 2 (letras blancas neutras, LN; imágenes neutras, IN; imágenes positivas o agradables, IA; imágenes negativas o desagradables, ID) en la fase de calibración.

emocionales, relativos a las condiciones IA e ID, frente a los neutros de las condiciones LN e IN, tal y como era de esperar según la literatura previa (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). Asimismo, este componente también mostró diferencias significativas entre los estímulos neutros, ya que la *diferencia de amplitud* obtenida por los estímulos en la condición IN fue mayor en comparación a la presentada por la condición LN.

En cuanto a la región posterior, se observaron los siguientes resultados significativos. En primer lugar, el P2 asociado a las imágenes neutras y agradables – condiciones IN e IA – fue más negativo que para las letras de la condición LN (figura 13). Asimismo, el N2 fue más negativo para las imágenes neutras que para las letras. Por otro lado, el componente P300 fue más positivo en las condiciones con imágenes (IN, IA e ID) que en la condición de letras (LN). Este componente también fue significativamente mayor para los estímulos desagradables de la condición ID frente a los estímulos neutros de las condiciones LN e IN.

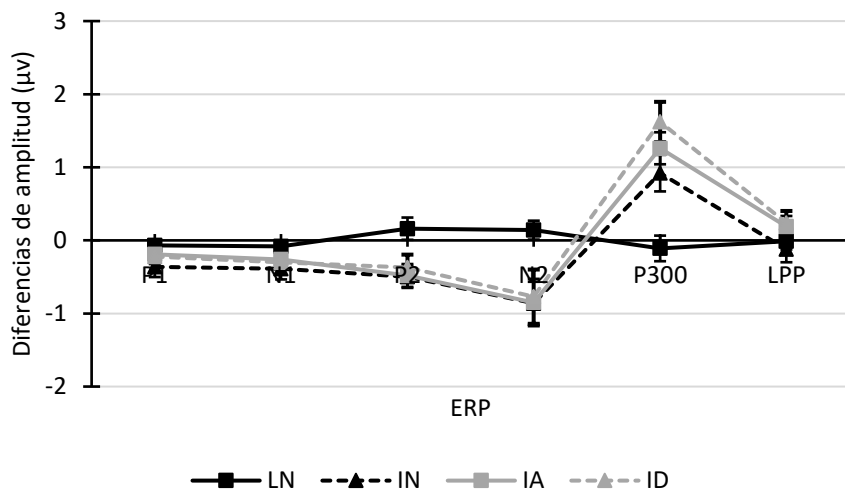


Figura 13. Diferencia de amplitud (media $\pm$ error estándar) en la región posterior (canales Pz, Oz, P3, P4, PO7 y PO8) entre los estímulos *target* y *non-target* para cada potencial relacionado con evento (*event-related potential*, ERP) y condición del estudio 2 (letras blancas neutras, LN; imágenes neutras, IN; imágenes positivas o agradables, IA; imágenes negativas o desagradables, ID) en la fase de calibración.

c. Medidas subjetivas

Todas las medidas subjetivas empleadas en el estudio han mostrado diferencias significativas entre condiciones. En las variables *rendimiento*, *atención*, *esfuerzo mental* y *frustración* se ha observado una valoración significativamente superior en las condiciones con imágenes (IN, IA e ID) frente a la condición con letras (LN) (figura 14). Con respecto a la variable *placer*, se mostró una valoración más positiva para las condiciones con imágenes neutras y agradables (IN e IA) en comparación a aquellas con imágenes desagradables o letras (ID e ID). Por último, las puntuaciones relativas a la variable *satisfacción* fueron significativamente superiores en las imágenes neutras y agradables (IN e IA) frente a las letras (LN).

En resumen, este trabajo mostró una clara superioridad de todos los conjuntos de imágenes frente a las letras en cuanto a rendimiento. Por tanto,

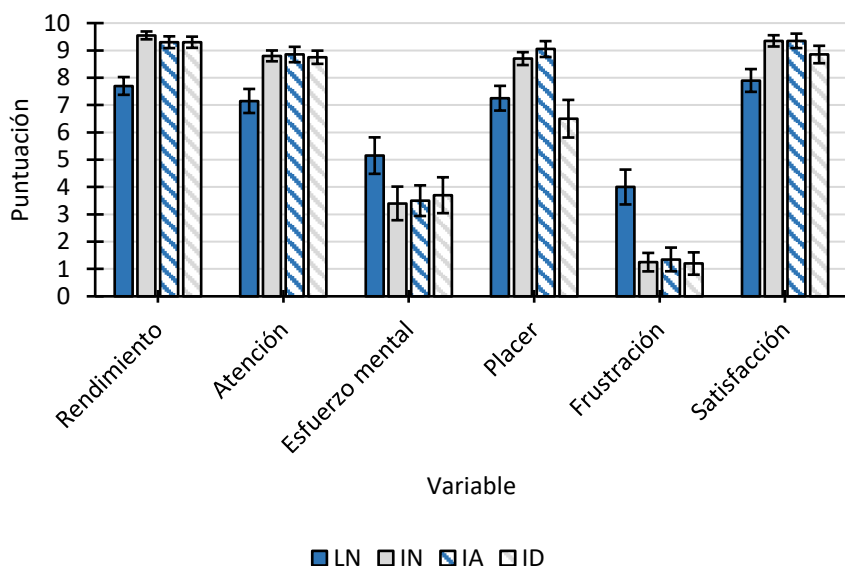


Figura 14. Puntuación (media $\pm$ error estándar) en cada una de las variables subjetivas empleadas para cada condición del estudio 2 (letras blancas neutras, LN; imágenes neutras, IN; imágenes positivas o agradables, IA; imágenes negativas o desagradables, ID).

la hipótesis 1 del estudio quedó satisfactoriamente cumplida. En referencia a las variables subjetivas, las condiciones con imágenes neutras y agradables (o positivas) han sido las mejor valoradas. No obstante, se incide en que el conjunto de imágenes agradables escogidas, con alto nivel de activación, podría ser no apropiado para determinados contextos ya que la mayoría de las imágenes seleccionadas presentaban desnudos explícitos. Finalmente, a pesar de lo esperado, la hipótesis 2 fue rechazada ya que no se observó ningún efecto en el rendimiento debido a la utilización de imágenes emocionales (agradables o desagradables) frente a las neutras.

3.3. Estudio 3

El estudio 2 mostró que el uso de imágenes como estímulos visuales bajo el RCP presentaba un aumento del rendimiento en comparación al uso de las letras. Por tanto, el objetivo del estudio 3 fue evaluar si esta mejora del

rendimiento bajo el RCP era también hallada bajo un paradigma basado en la RSVP.

- Hipótesis 1. El RCP presentará un rendimiento superior a la RSVP.
- Hipótesis 2. El efecto de mejora producido por el uso de imágenes será mayor en RCP en comparación al producido en la RSVP (efecto de interacción entre el paradigma de presentación y los estímulos).

Para evaluar el efecto de los estímulos en cada paradigma de presentación, se llevó a cabo un diseño factorial (2×2) con cuatro condiciones: letras bajo la RSVP (L-RSVP), imágenes bajo la RSVP (I-RSVP), letras bajo el RCP (L-RCP) e imágenes bajo la RCP (I-RCP). Este estudio empleó tres dimensiones para evaluar los resultados obtenidos: (a) el rendimiento, a través de la *accuracy* y la *ITR* en una fase de calibración y otra *online*; (b) la forma de onda de la señal EEG, a través del estudio de su *amplitud* (μV) en cada instante a partir de los 0 hasta los 800 ms desde la presentación del estímulo; y (c) variables subjetivas relativas al nivel de esfuerzo necesario para realizar la tarea correctamente (*esfuerzo*), el nivel de fatiga producido por el control de la interfaz (*fatiga*), la selección del estímulo preferido (*estímulo preferido*), la selección del paradigma preferido (*paradigma preferido*) y la selección de la condición favorita (*condición favorita*).

a. Rendimiento

Los resultados relativos a la *accuracy* y a la *ITR* durante la fase de calibración mostraron un efecto principal del factor relativo al paradigma de presentación, indicando un mayor rendimiento para el RCP en comparación a la RSVP. Sin embargo, durante la fase *online*, sólo se hallaron diferencias significativas en los factores objeto de estudio para la variable *ITR*, y no para la *accuracy* (figura 15). Esto es debido a que el número de secuencias para la fase *online* fue adaptado en base a lo obtenido en la fase de calibración, dando como resultado que la *accuracy* fuera similar entre condiciones, pero a diferentes tiempos de selección. Concretamente, con relación a la *ITR* en la fase *online*, se hallaron dos efectos principales, uno relativo al paradigma de presentación y otro a los estímulos empleados. Por un lado, el factor relativo al paradigma de presentación mostró que el RCP presentó una mayor *ITR* frente a la RSVP (confirmación de la hipótesis 1). Por otro lado, el factor relativo a los estímulos mostró que las imágenes

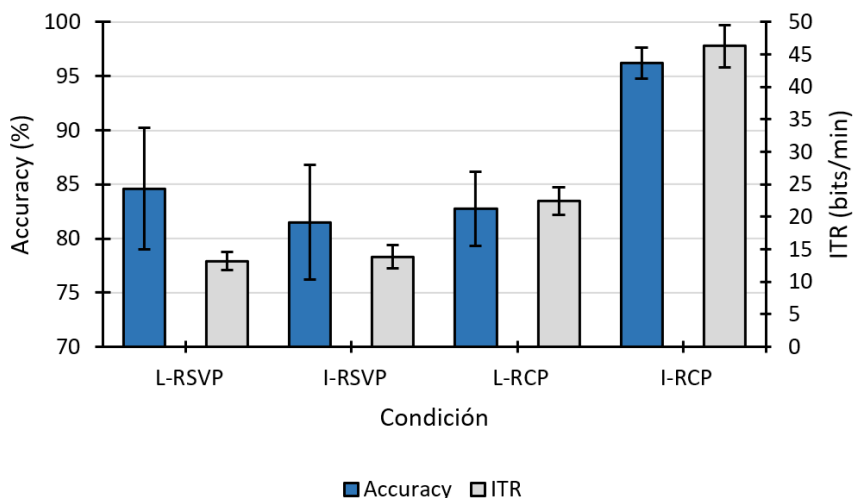


Figura 15. Accuracy (%) y velocidad de transferencia de información (*information transfer rate*, ITR) (media $\pm$ error estándar) para cada una de las condiciones del estudio 3 (letras bajo la presentación visual serial rápida, L-RSVP; imágenes bajo la presentación visual serial rápida, I-RSVP; letras bajo el paradigma de filas y columnas, L-RCP; imágenes bajo el paradigma de fila y columna, I-RCP) en la fase online.

mostraron un rendimiento superior a las letras. Sin embargo, en la figura 15 se observa cómo este efecto es debido, principalmente, a los buenos resultados obtenidos por la condición I-RCP, y no por I-RSVP. Además de los efectos principales mencionados, se halló un efecto de interacción entre ambos factores (*paradigma $\times$ estímulo*). Este efecto de interacción mostró que, efectivamente, el uso de imágenes tenía un impacto diferente según el paradigma de presentación utilizado. Concretamente, el efecto de las imágenes fue más beneficioso bajo el RCP que bajo la RSVP (confirmación de la hipótesis 2).

b. Forma de onda de la señal EEG

Los resultados hallados en el análisis de la señal EEG coinciden con los obtenidos en rendimiento. Por un lado, las condiciones basadas en la RSVP, tanto con imágenes (I-RSVP) como con letras (L-RSVP), presentaron una forma de onda relativamente similar (figura 16), por lo que resulta coherente que su rendimiento también lo fuera. Sin

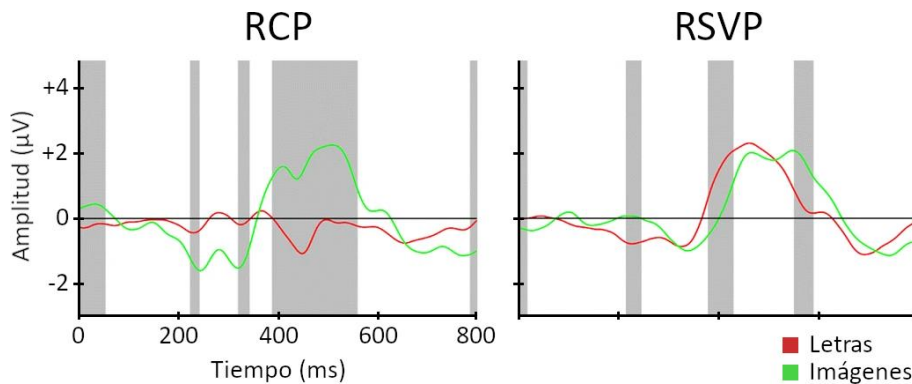


Figura 16. Promediado de la diferencia de amplitud (μV) entre los estímulos *target* y *non-target* de los potenciales relacionados con eventos (0-800 ms) para el paradigma de filas y columnas (RCP) y la presentación visual serial rápida (RSVP) con cada tipo de estímulo (letras o imágenes) en el canal Oz, durante la fase de calibración. Los intervalos significativos son marcados con un fondo gris en el eje temporal.

embargo, bajo el RCP, al igual que sucedió con el rendimiento, se observaron grandes diferencias entre los ERP según el tipo de estímulo empleado, especialmente para los componentes N2 y P300. Por tanto, estos resultados podrían explicar por qué las variables relativas al rendimiento presentaron puntuaciones similares entre letras e imágenes bajo la RSVP, pero diferentes bajo el RCP.

c. Medidas subjetivas

En referencia a las variables *esfuerzo* y *fatiga*, ambas mostraron un efecto principal del factor paradigma de presentación (figura 17). Concretamente, se observó que el RCP presentó puntuaciones más bajas para ambas variables en comparación a la RSVP. Continuado con estas variables, únicamente el *esfuerzo* mostró un efecto de interacción entre el paradigma de presentación y el estímulo empleado (*paradigma* $\times$ *estímulo*). Dicho efecto de interacción reveló que el uso de imágenes afectaba de forma diferente según el paradigma empleado: mientras la condición I-RCP mostró las puntuaciones más bajas de *esfuerzo*, la condición I-RSVP mostró las más altas.

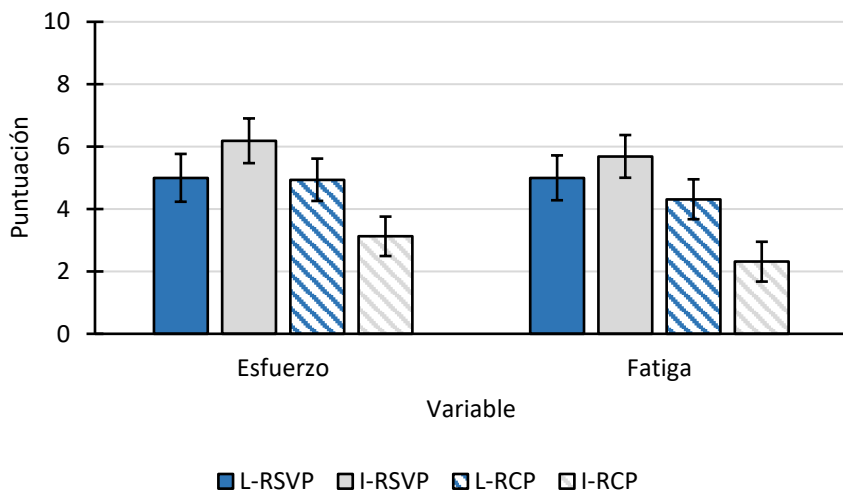


Figura 17. Puntuación (media $\pm$ error estándar) en las variables subjetivas de esfuerzo y fatiga para cada condición del estudio 3 (letras bajo la presentación visual serial rápida, L-RSVP; imágenes bajo la presentación visual serial rápida, I-RSVP; letras bajo el paradigma de filas y columnas, L-RCP; imágenes bajo el paradigma de fila y columna, I-RCP).

En referencia a las preferencias de los usuarios, el RCP fue el paradigma de presentación preferido por los participantes frente a la RSVP, así como las imágenes frente a las letras en el caso de los estímulos (figura 18). No obstante, como se explicará en las siguientes líneas, se observó que la preferencia por las imágenes podría ser debida a su asociación con el RCP. En referencia a la condición preferida por los participantes, mientras la condición I-RCP fue la preferida por más de la mitad de los participantes, ninguno de ellos seleccionó la condición I-RSVP como tal; de hecho, esta última condición fue la que peores puntuaciones mostró en los ítems relativos a *esfuerzo* y *fatiga*.

En resumen, este trabajo mostró cómo el uso de imágenes como estímulos en una ERP-BCI visual tiene un efecto diferente en el rendimiento según el paradigma de presentación empleado. Concretamente, este efecto fue notablemente más beneficioso bajo el RCP que bajo la RSVP, donde apenas fue observado. Por tanto, la hipótesis 2 del estudio quedó cumplida. Este efecto de interacción quedó corroborado por los análisis de la señal EEG, así como por las preferencias de los usuarios, donde incluso la condición P-RSVP



Figura 18. (A) Número y porcentaje de participantes que prefirieron cada paradigma de presentación: presentación visual serial rápida (RSVP) o paradigma de filas y columnas. (B) Número y porcentaje de participantes que prefirieron cada tipo de estímulo: letras o imágenes. (C) Número y porcentaje de participantes que prefirieron cada condición del estudio 3: letras bajo la presentación visual serial rápida (L-RSVP), imágenes bajo la presentación visual serial rápida (I-RSVP), letras bajo el paradigma de filas y columnas (L-RCP) e imágenes bajo el paradigma de fila y columna (I-RCP).

obtuvo las peores puntuaciones. Asimismo, la hipótesis 1 del estudio también fue aceptada ya que el rendimiento de las condiciones bajo el RCP fue significativamente superior al de las condiciones bajo la RSVP. En definitiva, los resultados generales de este trabajo son especialmente interesantes ya que prueban que los hallazgos previos hechos con relación a los estímulos bajo el RCP – el paradigma más utilizado hasta la fecha – pueden no ser trasladados a otros paradigmas, como el basado en la RSVP, el cual resulta más adecuado para pacientes con problemas oculomotores.

3.4. Estudio 4

El estudio 3 reveló que el uso de imágenes como estímulos bajo el paradigma de la RSVP no presentaba un aumento del rendimiento tal y como sucedía en el caso del RCP. Una de las principales diferencias entre el RCP y la RSVP es la distancia o solapamiento entre los diferentes estímulos que aparecen en la interfaz. Por tanto, el estudio 4 tuvo como objetivo evaluar el posible efecto del solapamiento entre estímulos visuales sobre el rendimiento en una ERP-BCI visual.

- Hipótesis 1. Un mayor nivel de solapamiento entre los estímulos de una ERP-BCI visual producirá un empeoramiento del rendimiento.

Para evaluar el posible efecto del solapamiento entre estímulos, fueron probadas cuatro condiciones bajo el paradigma de la RSVP con diferentes niveles de solapamiento en una fase de calibración: 0%, 33.3%, 66.7% y 100%. Este estudio empleó dos dimensiones para evaluar los resultados obtenidos: (a) el rendimiento, a través de la *accuracy*; y (b) la forma de onda de la señal EEG, a través del estudio de su amplitud (μV) en cada instante a partir de los -200 hasta los 800 ms desde la presentación del estímulo.

a. Rendimiento

Los resultados relativos a la *accuracy* mostraron que un mayor nivel de solapamiento entre los estímulos afecta negativamente al rendimiento de una ERP-BCI visual (confirmación de la hipótesis 1) (figura 19). De forma más específica, la condición sin solapamiento (0%) mostró un rendimiento significativamente superior al resto de las condiciones (33.3%, 66.7% y 100%). Asimismo, la condición con un solapamiento del 33.3% también reveló un rendimiento significativamente superior frente a las condiciones con un 66.7% y 100% de solapamiento. Finalmente, las condiciones con un nivel de

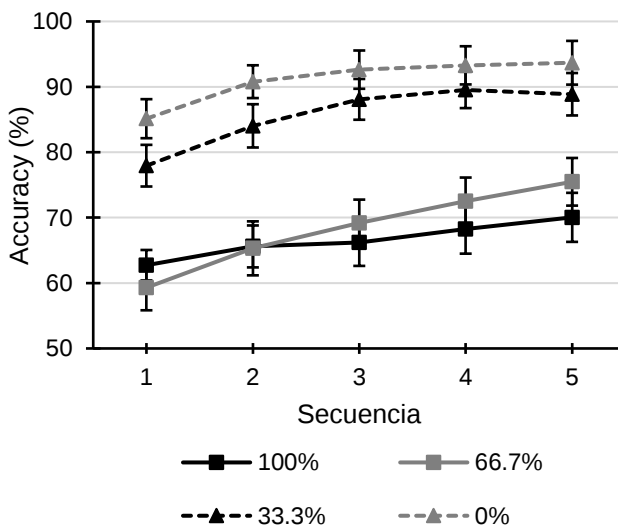


Figura 19. *Accuracy* (%) (media $\pm$ error estándar) en cada una de las secuencias en la tarea de calibración para cada condición del estudio 4.

solapamiento superior al 50% (66.7% y 100%) mostraron un rendimiento similar.

b. Forma de onda de la señal EEG

Los resultados relativos al rendimiento se encontraron corroborados y justificados por los análisis de la forma de onda de la señal EEG. Estos análisis mostraron que, a mayor nivel de solapamiento, menores eran las diferencias entre las amplitudes asociadas a los estímulos *target* y *non-target*. Concretamente, mientras la amplitud del estímulo *target* fue relativamente similar entre las condiciones, la amplitud del estímulo *non-target* ofreció diferencias significativas entre condiciones (figura 20). A medida que aumentaba el solapamiento entre estímulos, la amplitud del estímulo *non-target* era más parecida a la del *target*, lo que dificultaría la tarea del clasificador. Los componentes que variaron de amplitud entre condiciones para el caso de los estímulos *non-target* fueron los componentes N400 (en los canales Fz y Cz) y P300 (en los canales P4, Oz, PO7 y PO8).

En definitiva, este trabajo mostró cómo, a medida que los estímulos visuales (*targets* y *non-targets*) presentaban un mayor nivel de solapamiento, la amplitud de la señal EEG relativa a los estímulos *non-target* fue mayor, lo que provocó una disminución de la diferencia de amplitud con respecto a la señal relativa a los estímulos *targets*. Una menor diferencia de amplitud entre los estímulos (*target* y *non-target*) en las condiciones con mayor solapamiento se asoció a un menor rendimiento del clasificador, lo cual dio lugar a la aceptación de la hipótesis 1 del estudio. Estos resultados podrían interpretarse como una mayor dificultad de los participantes para ignorar los

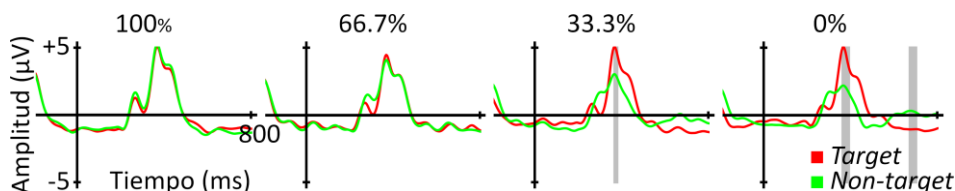


Figura 20. Comparación de la amplitud (μV) de la señal electroencefalográfica asociada al estímulo *target* frente al *non-target* en la fase de calibración para cada condición del estudio 4 (100%, 66.7%, 33.3% y 0%) en el canal Oz. Los intervalos significativos son marcados con un fondo gris en el eje temporal.

estímulos *non-target* a medida que se incrementa el nivel de solapamiento con respecto a los estímulos *target*. La mayoría de los trabajos anteriores se han centrado en potenciar el estímulo que debe ser atendido (*target*) para que los ERP asociados sean fácilmente reconocibles por parte del sistema, como en los estudios 1 y 2 de la presente tesis doctoral. Sin embargo, para producir una mejora del rendimiento bajo el paradigma de la RSVP – donde los estímulos están completamente solapados – este enfoque puede resultar incompleto ya que también se aumenta la amplitud de los posibles ERP relativos al estímulo *non-target*. Este solapamiento en la RSVP podría ser una de las posibles causas que justifiquen por qué en el estudio 3 no se observó un efecto beneficioso por el uso de las imágenes bajo dicho paradigma de presentación. Por tanto, se pone de manifiesto que, en aquellos paradigmas con un alto nivel de solapamiento (como la RSVP), podría ser adecuado el empleo de estrategias que, además de considerar la amplitud del estímulo *target*, consideren la amplitud del estímulo *non-target*.

Capítulo 4

Discusión

4.1. Resultados obtenidos y literatura relacionada

En esta sección se discutirán los resultados obtenidos contextualizándolos con la literatura previa. Igualmente, se plantearán aquellas cuestiones surgidas a partir de los estudios que avalan la tesis doctoral y que puedan dar lugar a futuras líneas de investigación. Se hará un especial énfasis en los resultados relativos al rendimiento. Además de volver a hacer hincapié en algunos puntos que ya fueron expuestos en los artículos que avalan la presente tesis doctoral, se actualizarán estas cuestiones en base a lo reportado por publicaciones posteriores.

4.1.1. Estudio 1

El primer trabajo mostró cómo la iluminación de los estímulos en forma de bloque ofreció mejores resultados que la iluminación de las letras. Estos resultados corroboraron lo hallado en otros estudios donde el tamaño de los estímulos podría ser una variable que mejorara el rendimiento de una ERP-BCI visual (Kellicut-Jones y Sellers, 2018; Speier et al., 2017). Sin embargo, el estudio 1 no presentó ningún efecto de mejora asociado a la heterogeneidad relativa a los colores para ninguno de los estímulos (letras o bloques) ni en

ninguna de las fases del estudio (calibración u *online*). Es interesante observar que la condición de las letras de colores mostró el peor rendimiento, algo que también fue obtenido en el estudio preliminar (Fernández-Rodríguez et al., 2018). Estos resultados son opuestos a los obtenidos previamente por Ryan et al. (2017) y Ryan et al. (2018), donde la iluminación de las letras en diferentes colores ofreció un mejor rendimiento frente a la iluminación homogénea de las letras en color blanco. Debido a que los resultados obtenidos en el estudio preliminar (Fernández-Rodríguez et al., 2018) y en el estudio 1 han sido similares, es poco probable que sean debidos al azar. Por tanto, es razonable pensar que realmente haya un motivo por el que, en ambos trabajos, la condición de las letras de colores fuera la peor. Algunas de las posibles explicaciones de por qué estos resultados son diferentes a los de los trabajos de Ryan et al. (2017) y Ryan et al. (2018) fueron expuestas en el estudio 1. Entre estas explicaciones podrían destacarse el mayor tamaño de la matriz en los experimentos de Ryan et al. y el empleo de un paradigma de iluminación ligeramente diferente. Mientras que la propuesta del estudio 1 empleó una matriz 3×4 y cuya aparición de los estímulos era realizada siguiendo el RCP clásico, en los trabajos de Ryan et al. fue utilizada una matriz 8×9 basada en el paradigma *checkboard* (Townsend et al., 2010), en el cual las iluminaciones no eran realizadas por filas y columnas sino por conjuntos pseudoaleatorios. Esta diferencia de resultados entre trabajos plantea la necesidad de estudiar qué factor – o factores – es el causante de invertir el efecto de mejora producido por la iluminación de las letras con colores heterogéneos en Ryan et al. (2017) y Ryan et al. (2018).

4.1.2. Estudio 2

El estudio 2 mostró una clara superioridad del uso de imágenes frente al uso de letras como estímulos en una ERP-BCI visual. De forma más específica, la principal novedad del estudio fue el alto rendimiento de las condiciones con imágenes, llegando a mostrar en la fase *online* una *accuracy* del 99.64% y una ITR de 46.07 bits/min para la condición que empleó estímulos emocionales positivos. Como se discutió en el artículo, los resultados obtenidos por las condiciones de las imágenes fueron comparables a los obtenidos usando los estímulos de las caras, siendo dichos estímulos los que más relevancia están teniendo en los últimos años en las ERP-BCI visuales (p. ej., Z. Lu et al. (2020), S. Li et al. (2020) y Zhang et al. (2021). No obstante, debido a las diferencias específicas entre las interfaces empleadas en los diferentes trabajos, no es fácil realizar una comparación

objetiva entre ambos tipos de estímulos. Sin embargo, dos trabajos relativamente recientes sí compararon el uso de caras frente a otro tipo de imágenes. Por un lado, Kellicut-Jones y Sellers (2018) llevaron a cabo un estudio donde las condiciones emplearon como estímulo una cara (Albert Einstein) o una imagen pixelada no reconocible. Los resultados de este trabajo mostraron que el tipo de estímulo utilizado no producía diferencias significativas en el rendimiento. Por otro lado, Jones y Sellers (2019) compararon el rendimiento asociado al uso de diferentes tipos de estímulos: una cara (Albert Einstein) frente a una localización (La Casa Blanca), y ésta última frente a una herramienta (un martillo). En ninguna de las dos comparaciones – cara frente a localización, y localización frente a herramienta – se obtuvieron diferencias significativas. Por tanto, estos trabajos parecen indicar que no hay diferencias entre el uso de caras u otro tipo de imágenes como estímulos en una ERP-BCI visual. No obstante, como fue adelantado, la tendencia actual de los estudios ha continuado con el uso de las caras.

Numerosos trabajos han evaluado diferentes parámetros relacionados con la utilización de las caras en una ERP-BCI visual. Algunos ejemplos de parámetros que han mejorado el rendimiento de estos sistemas son los siguientes: el uso de caras verdes frente a las de un color natural (Q. Li et al., 2015), la utilización de caras semitransparentes frente a opacas (Cheng et al., 2017), o el empleo de la propia cara del participante frente a la cara de un personaje famoso (Z. Lu et al., 2020). Sería interesante que futuros estudios evaluaran si una adaptación de estas modificaciones pudiera provocar también una mejora del rendimiento en un paradigma que utilizara otros tipos de imágenes como estímulos (p. ej., cambiar el color natural de la imagen representada, imágenes semitransparentes, o la utilización de un objeto propiedad del usuario). Una de las grandes ventajas del uso de imágenes – en comparación a las caras – es que éstas permiten establecer una relación directa entre el estímulo y el comando que el usuario desea seleccionar (p. ej., seleccionar la imagen del vaso de agua en caso de que el usuario quiera agua). Esto puede ser especialmente útil en paradigmas basados en la RSVP, donde las letras no están previamente dispuestas en la pantalla para que el usuario atienda al estímulo que se superponga a la letra objetivo.

En referencia a la utilización específica de estímulos emocionales, el estudio 2 no mostró las esperadas diferencias en las variables relativas al rendimiento entre las condiciones con imágenes emocionales (positivas o

negativas) y neutras. A pesar de no encontrarse diferencias en el rendimiento entre estas condiciones, sí se mostraron diferencias significativas en algunos ERP (P300 y LPP). Es posible que estas diferencias en la señal EEG no fueran suficientes como para producir una diferencia en el rendimiento. En la publicación relativa a este estudio, fueron ofrecidas algunas posibles soluciones para fortalecer el efecto de las imágenes emocionales en la señal EEG de manera que, tal vez, pudieran tener un efecto sobre el rendimiento. Algunas de las propuestas quedaron centradas en evitar un posible efecto de habituación hacia las imágenes emocionales. La exposición repetida a los estímulos emocionales hacen que pierdan su capacidad de provocar una respuesta emocional (Codispoti et al., 2006; Codispoti y De Cesarei, 2007). Un ejemplo de posible solución hubiera sido que la interfaz pudiera asociar diferentes imágenes a una misma letra, de tal manera que la imagen que aparece superpuesta a una letra concreta no fuera siempre la misma.

En la literatura relacionada con las ERP-BCI visuales no se ha encontrado otro trabajo que haya puesto a prueba si los estímulos específicamente diseñados para provocar una respuesta emocional – es decir, obtenidos de una batería de imágenes puntuadas según su nivel de valencia y activación, como los empleados en el estudio 2 – podrían incrementar el rendimiento de estos sistemas. Los estudios más relacionados han sido aquellos que compararon el uso de caras neutras frente a caras mostrando una emoción. Tres de estos trabajos que merecen ser especialmente mencionados son los de Jin et al. (2012), Zhao et al. (2011) y Jin et al. (2014). Por un lado, en Jin et al. (2012) fueron empleados los siguientes estímulos visuales en un paradigma relativamente similar al RCP⁵: letras, caras neutras y caras sonrientes. Estos autores no hallaron diferencias en el rendimiento entre las caras neutras y las sonrientes, pero sí entre los dos tipos de caras y las letras⁶. Por tanto, ofrecieron unos resultados similares a los obtenidos en el estudio 2, donde las imágenes no mostraron diferencias significativas entre ellas, pero sí entre los conjuntos de imágenes frente a las letras. Por otro lado, Zhao et al. (2011) emplearon tres tipos de estímulos visuales utilizando el paradigma de la RSVP: objetos, caras neutras y caras con diferentes emociones. Dicho trabajo presentó diferencias significativas entre las condiciones en la señal EEG

⁵ Los elementos no se iluminaban por filas y columnas, sino por conjuntos pseudoaleatorios.

⁶ Este trabajo no muestra análisis estadísticos relativos a la señal EEG. En el artículo declaran que “*because this work entails numerous issues with different ERP components, we have submitted these results separately, as a companion paper*”. No obstante, tras una exhaustiva búsqueda, dicho artículo no ha sido encontrado.

asociada a tres componentes: potencial positivo de vértice (*vertex-positive potential*, VPP), caras neutras frente a objetos; LPP, caras emocionales frente a caras neutras y objetos; y N250, caras neutras frente a objetos. En cuanto a rendimiento, los autores afirman que “*the classification performance for single trial data demonstrated the superiority of emotional faces-related ERPs applied in the oddball BCI paradigm*” pero no muestran ningún tipo de análisis estadístico que apoye dicha afirmación (p. ej., un contraste de hipótesis ofreciendo el valor de p asociado). De esta manera, puede ser afirmado que en la única dimensión donde se han encontrado diferencias significativas debido al empleo de estímulos emocionales es en la señal EEG, donde el uso de estímulos emocionales (caras expresando una emoción) incrementaría la amplitud del LPP en comparación a los estímulos neutros (caras neutras), al igual que en el estudio 2. Finalmente, Jin et al. (2014) emplearon un paradigma con cinco elementos disponibles que se encontraban formando una circunferencia y sobre los cuales se presentaban los estímulos que debían ser atendidos por el usuario (figura 21). Las condiciones variaron en el tipo de estímulo empleado: una pseudocara⁷ que era presentada sobre otra pseudocara ligeramente diferente (figura 21A), una cara triste sobre una cara sonriente (figura 21B), y una cara neutra sobre un círculo blanco (figura 21C). Todos los estímulos se basaron en caras dibujadas, no caras reales. Este trabajo mostró diferencias significativas en el rendimiento durante una tarea de calibración, usando una secuencia, entre la condición de caras emocionales frente a las condiciones de caras neutras y pseudocaras. En una posterior fase *online*, usando dos secuencias, sólo se mostraron diferencias entre la condición de caras emocionales y pseudocaras. A pesar de la clara tendencia de la condición de las caras emocionales a mostrar los mejores resultados, este estudio puede presentar un problema de diseño para concluir que el uso de caras emocionales mejora el rendimiento frente al uso de caras neutras. Dicho problema era que las condiciones con caras emocionales y caras neutras difirieron también en el elemento sobre el que aparecían los estímulos *target*: una cara sonriente para la condición de las caras emocionales, y un círculo blanco para la condición de caras neutras. Para poder afirmar que las caras emocionales mejoraron el rendimiento frente a las neutras, el elemento de partida sobre el que aparecían los estímulos *target* debió ser similar en ambas condiciones, por ejemplo, un círculo blanco. Por tanto, puede ser afirmado que, hasta la fecha, no queda claro que el uso de estímulos emocionales mejore el rendimiento de una ERP-BCI visual. Sin embargo, no

⁷ Las pseudocaras estaban compuestas por los rasgos de una cara, pero desordenados.

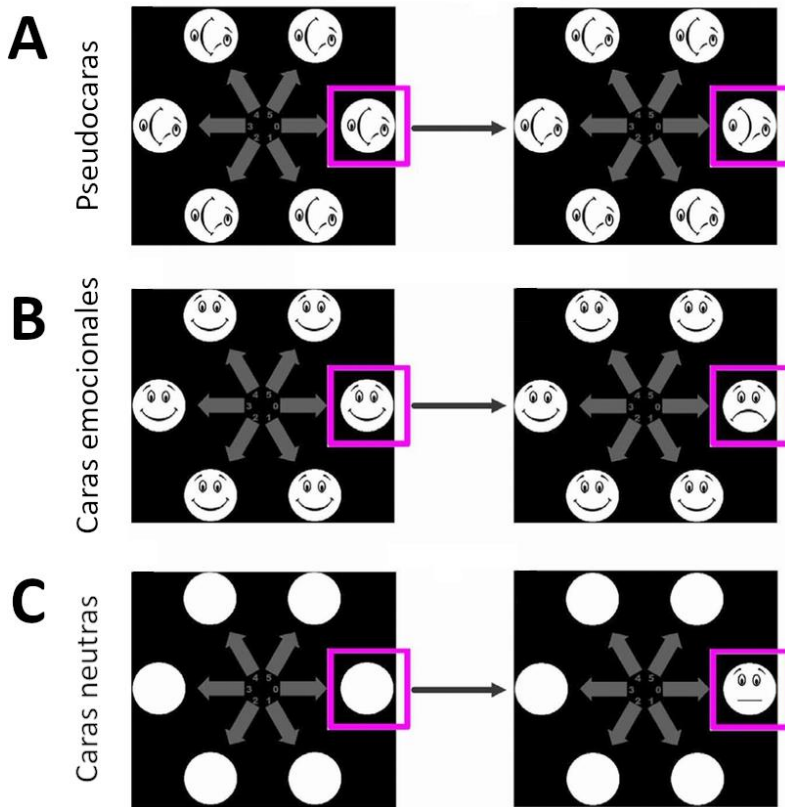


Figura 21. Cada una de las condiciones empleadas en Jin et al. (2014): (a) pseudocaracteres, (b) caras emocionales y (c) caras neutras. La columna de la izquierda representa la interfaz con los elementos iniciales, mientras que la columna de la derecha muestra la aparición del estímulo *target* sobre uno de los elementos anteriores.

se descarta que, en futuros trabajos, pudiese llegar a hallarse este efecto de mejora en el rendimiento considerando todos los estudios previos relativos a esta temática, dentro y fuera del ámbito de las ERP-BCI.

4.1.3. Estudio 3

A pesar del alto rendimiento de las condiciones con imágenes en el estudio 2 bajo el RCP, estos resultados no pudieron ser replicados bajo la RSVP en el estudio 3. Concretamente, se mostró que el efecto de las imágenes fue

significativamente mayor bajo el RCP que bajo la RSVP. Por otro lado, tal y como fue previamente reportado por Chennu et al. (2013), las condiciones basadas en el RCP mostraron un rendimiento superior a las basadas en la RSVP. No obstante, se recuerda que el RCP puede presentar un gran inconveniente, y es que depende del control ocular para su adecuado manejo (Brunner et al., 2010; Treder y Blankertz, 2010), no siendo apropiado para pacientes con problemas oculomotores.

Los resultados obtenidos por el estudio 3 podrían indicar que las imágenes u otros estímulos alternativos – como las caras – que sí incrementaron el rendimiento bajo el RCP, en comparación a las letras, no lo harían bajo la RSVP. Sin embargo, hay numerosos trabajos que han hallado diferencias significativas manipulando el tipo de estímulo presentado en paradigmas basados en la RSVP (p. ej., Chen et al. (2016), Ron-Angevin et al. (2021) y Lees et al. (2020)). Por tanto, es posible que la ausencia de diferencias significativas entre letras e imágenes bajo la RSVP pueda ser algo propio de las imágenes. De hecho, en esta misma línea de investigación sobre el uso de imágenes, en Ron-Angevin et al. (2021) se llevó a cabo una comparación entre tres tipos de estímulos bajo la RSVP: letras, imágenes y caras. Dicho estudio mostró un incremento significativo de la ITR debido al uso de las caras en comparación al uso de las letras en una fase *online*. Las imágenes no presentaron diferencias significativas en comparación a las caras o las letras. Por tanto, los resultados obtenidos en el estudio 3 corroborarían lo obtenido en Ron-Angevin et al. (2021), según lo cual, bajo la RSVP, el uso de imágenes como estímulos visuales no muestra diferencias significativas en el rendimiento frente al uso de letras. Esto parece indicar que no todos los estímulos alternativos que presenten una mejora del rendimiento bajo el RCP lo hagan también bajo la RSVP. No obstante, a pesar de que en el estudio de Ron-Angevin et al. (2021) no se hallaron diferencias significativas con respecto al rendimiento de las imágenes, éstas mostraron una mejor valoración – aunque tampoco significativa – en cada una de las medidas subjetivas (nivel de fatiga, nivel de estrés, complejidad de utilización y velocidad de presentación adecuada) en comparación a la condición de las caras. Por tanto, tampoco sería recomendable descartar las imágenes para su posible uso bajo la RSVP, ya que la experiencia del usuario durante el control del sistema es un factor que también debe ser adecuadamente considerado. Otro trabajo relevante, y recientemente publicado, puso a prueba tres tipos de estímulos en una ERP-BCI visual basada en la RSVP: palabras, números e imágenes (Lees et al., 2020). Los resultados de este estudio mostraron que las

palabras obtuvieron un mejor rendimiento (utilizando como variable dependiente el área bajo la curva de la característica operativa del receptor) en comparación a los otros dos estímulos (números e imágenes) cuando el tiempo de presentación de cada estímulo tenía una duración aleatoria de entre 100 y 200 ms. Por tanto, se puso de manifiesto que las palabras podrían ser un estímulo visual apropiado para una ERP-BCI visual que no requiriera del control ocular. Asimismo, el uso de estos estímulos presentaría la misma ventaja que las imágenes, en comparación a las letras o caras, ya que el mismo estímulo se podría identificar directamente con el comando asociado (p. ej., seleccionar la palabra “agua” si el participante desea agua). Por tanto, determinar el tipo de estímulo más adecuado en una ERP-BCI visual que no requiera control ocular es una línea de investigación que aún plantea numerosas dudas y, por lo tanto, sería interesante seguir explorando.

4.1.4. Estudio 4

En el estudio 4 se corroboró que el solapamiento espacial entre los estímulos visuales de una ERP-BCI visual se encontraba asociado con un deterioro del rendimiento. Este estudio fue llevado a cabo bajo una condición de movilidad ocular completa, por lo que es admitido que estos resultados podrían diferir en pacientes con movimientos oculares restringidos, lo cual sería interesante estudiar en futuros trabajos. Sin embargo, la capacidad de los pacientes para mover los ojos no es cuestión de todo o nada, sino que dependerá del grado de afección oculomotora (Sharma et al., 2011). Por tanto, puede ser recomendable adaptar el nivel de solapamiento entre los estímulos (así como el tamaño o la distancia entre ellos) a las capacidades oculomotoras del paciente. Este trabajo ayudó a indicar que el peor desempeño en las ERP-BCI visuales que presentan un solapamiento entre estímulos, como las basadas en la clásica RSVP, se podrían deber a la incapacidad del usuario para ignorar los estímulos *non-target*. Estas conclusiones fueron obtenidas tras los análisis efectuados en la señal EEG, donde se observó que la amplitud de los estímulos *target* y *non-target* tendían a equipararse a medida que se incrementaba el nivel de solapamiento entre ellos. Por tanto, podría ser interesante que futuros trabajos estudiaran cómo disminuir la atención ofrecida a los estímulos *non-target* en una interfaz que no dependa del control ocular. Asimismo, la perspectiva de este estudio fue principalmente teórica, ya que empleó una interfaz con sólo dos elementos disponibles, por lo que sus resultados deberían ser cuidadosamente trasladados a los obtenidos en interfaces donde el número de estos elementos sea mayor. No obstante, como

se expuso en el estudio, esta perspectiva teórica inicial era necesaria para controlar adecuadamente el porcentaje de solapamiento entre estímulos.

En la práctica, el solapamiento entre estímulos no es una variable aislada, sino que depende de otros factores que han sido previamente estudiados de forma individual. Algunos de estos factores han mostrado un efecto sobre la experiencia del usuario en el control del sistema. Dichos factores son los siguientes: (a) la superficie disponible para distribuir los estímulos (Y. Li et al., 2011; Medina-Juliá et al., 2020; Ron-Angevin et al., 2019), (b) el tamaño de los estímulos (Kellicut-Jones y Sellers, 2018) o (c) el número de estímulos disponibles (Sellers et al., 2006). La interacción entre estos elementos debería ser cuidadosamente estudiada. Por ejemplo, en una interfaz espacialmente limitada (p. ej., la pantalla de una tableta portátil) y que requiera numerosos estímulos, debe decidirse si se prefiere que los estímulos tengan un mayor tamaño (lo cual podría aumentar el rendimiento según Kellicut-Jones y Sellers (2018)) o que estos se encuentren solapados (lo que disminuiría el rendimiento según el estudio 4 de la presente tesis doctoral). Por tanto, resultaría importante conocer cuál de todos estos parámetros es el más conveniente para ser modificado (el tamaño de la interfaz, el número de comandos disponibles, el tamaño de los estímulos o el solapamiento entre éstos), sin perder de vista las limitaciones y necesidades del usuario. En definitiva, con este ejemplo, se ha intentado poner de manifiesto la importancia de estudiar de forma conjunta todas estas variables con la finalidad de ofrecer una ERP-BCI visual de utilidad para los potenciales usuarios de estos dispositivos.

4.2. Limitaciones y posibles mejoras

La presente tesis doctoral comprende el trabajo de cuatro años de investigación en el grupo UMA-BCI sobre el estudio de los estímulos visuales utilizados en una ERP-BCI visual. Concretamente, la línea de la tesis doctoral empezó a ser esbozada en 2017, siendo en 2018 cuando se iniciaron los experimentos relativos a las dos primeras propuestas (estudios 1 y 2), y 2019 cuando se iniciaron las dos restantes (estudios 3 y 4). Durante estos cuatro años ha existido un proceso de aprendizaje relativo a las ERP-BCI visuales y su evaluación, lo cual puede apreciarse en la evolución de los trabajos que avalan la presente tesis doctoral. Debido a este continuo proceso de aprendizaje, hay que reconocer que existen ciertos aspectos de los trabajos que podrían haber sido inicialmente mejorados. Por tanto, el objetivo de este

apartado es citar dichas limitaciones y ofrecer posibles mejoras que podrían haber sido implementadas. Los propios trabajos publicados ya incluyeron diversas autocríticas en las correspondientes secciones de discusión. Las autocríticas aquí comentadas harán referencia a aquellas que no fueron mencionadas en los propios artículos, ya fuera por falta de conocimientos entonces, o por su relación con trabajos posteriores. De manera más específica, las autocríticas estarán relacionadas con (a) el diseño experimental empleado, (b) las variables dependientes utilizadas, (c) el registro y análisis de la señal EEG, y (d) erratas detectadas en los estudios publicados.

a. Diseño experimental

El objetivo del diseño experimental es describir y explicar la causa – o las causas – de un determinado efecto (p ej., diferencias de rendimiento en una ERP-BCI visual). Lo que será expuesto en este apartado, realmente, más que una crítica es una cuestión pendiente que podría ser respondida por futuros trabajos. Gracias al diseño experimental empleado tanto en el estudio 2 como en el estudio 3, se ha mostrado que las imágenes funcionan significativamente mejor que las letras como estímulos en una ERP-BCI visual bajo el RCP. Sin embargo, el diseño experimental empleado no permite ofrecer una explicación precisa sobre por qué las imágenes funcionaron mejor que las letras. Las principales hipótesis relativas a la superioridad de las imágenes, frente a las letras, indicarían que puede ser causada por (a) la propia representación cognitiva de este tipo de estímulos (p. ej., el concepto de “barco” en comparación al concepto de letra “B”) o por (b) las propiedades estrictamente visuales (p. ej., la mayor superficie ocupada por las imágenes en comparación a la superficie de ocupada por las letras). Para responder a esta cuestión, hubiera sido conveniente que el estudio 2 emplease una condición que controlara al menos una de estas posibles variables. Por ejemplo, para verificar que la variable determinante en la diferencia de rendimientos pudiera ser la representación cognitiva del estímulo, y no las propiedades visuales, hubiera sido adecuado emplear una condición control con estímulos que igualen dichas propiedades estrictamente visuales frente a las imágenes pero sin ser una representación cognitiva (como la empleada en, por ejemplo, Kellicut-Jones y Sellers (2018)). Sin embargo, en el estudio 2 se estimó adecuado emplear los estímulos más utilizados por la literatura relacionada – es decir, las letras blancas – para que sirvieran

de referencia. De esta manera, se consideró más importante verificar que el uso de las imágenes como estímulos visuales era más adecuado que el uso habitual de las letras frente a la posibilidad de ofrecer una explicación de por qué las imágenes ofrecen un mejor rendimiento. Otra posible solución hubiera sido el empleo de paradigmas visuales y protocolos experimentales idénticos entre los estudios 1 y 2. Esto hubiera permitido establecer una comparación en la sección de discusión del estudio 2 sobre si las imágenes de dicho estudio ofrecían un mejor rendimiento que los bloques de colores del estudio 1, los cuales comparten al menos más propiedades visuales con las imágenes que las letras (p. ej., el tamaño de la superficie ocupada por el estímulo).

b. Variables dependientes

Los cuatro estudios llevados a cabo han empleado diferentes variables dependientes para evaluar el uso de cada una de las condiciones, incluyendo variables relativas al rendimiento, a la señal EEG y la experiencia subjetiva del usuario.

En primer lugar, en referencia a las variables relativas al rendimiento, hubiera resultado adecuado utilizar, desde un primer momento, variables más completas que la *accuracy*, como ha sido el caso de la *ITR* empleada en los estudios 2 y 3. Asimismo, en los estudios con fase *online* (estudios 1-3), el criterio para seleccionar el número de secuencias en la tarea *online* podría haberse escogido utilizando, por ejemplo, el *written symbol rate*, una métrica comúnmente empleada por otros trabajos para realizar esta selección (p. ej., Ma y Qiu (2017), Kellicut-Jones y Sellers (2018) y Ryan et al. (2017)).

En segundo lugar, sobre el análisis relativo a la señal EEG, se puede apreciar un progreso en las variables dependientes empleadas, especialmente entre los estudios 1 y 2 frente a los estudios 3 y 4. En el estudio 1 la variable dependiente utilizada (la *diferencia de amplitud* en valor absoluto entre la señal EEG asociada a los estímulos *target* y *non-target* en el intervalo temporal 200-600 ms) fue práctica para evaluar qué factores relativos a los estímulos podrían facilitar la discriminación entre estímulos *target* y *non-target*, lo cual debería encontrarse positivamente relacionado con el rendimiento del clasificador. No obstante, este análisis no permitía una completa descripción de qué componentes específicos estaban siendo afectados dentro del intervalo

temporal escogido. Por otro lado, en el estudio 2, la variable dependiente utilizada (la *diferencia de amplitud* entre la señal EEG asociada a los estímulos *target* y *non-target*) comparaba intervalos específicos relativos a los ERP obtenidos en la literatura relacionada con el estudio de estímulos visuales emocionales (Garrison et al., 2017), pero fuera del ámbito de las ERP-BCI visuales. Debido al paradigma específico empleado para el control de una ERP-BCI visual, es posible que los ERP obtenidos no se ajustaran perfectamente a esos intervalos. De esta manera, podría haber sido más adecuado emplear un análisis similar al realizado en los estudios 3 y 4. Los análisis ejecutados en los estudios 3 y 4 fueron llevados a cabo con la herramienta EEGLAB (Delorme y Makeig, 2004), la cual fue empezada a usar por el grupo UMA-BCI en 2019.

Finalmente, en referencia a las medidas subjetivas, la evaluación de la experiencia del usuario es un tema relativamente pendiente en el ámbito de las BCI. Al igual que la mayoría de los trabajos dentro de la temática de las ERP-BCI, los estudios que avalan la presente tesis doctoral han usado medidas *ad hoc*, es decir, específicamente diseñadas para los trabajos llevados a cabo. El uso de este tipo de medidas, aunque adecuado para la comparación entre las condiciones de un mismo estudio, dificulta la comparación con los trabajos de la literatura relacionada. Algunos estudios han utilizado cuestionarios tales como el NASA-TLX (Hart y Staveland, 1988) o el System Usability Scale (SUS) (Brooke, 1996). No obstante, estos cuestionarios suelen tener un carácter demasiado general, centrados en la evaluación de un determinado constructo (p. ej., la carga de trabajo en el NASA-TLX o la usabilidad en el SUS), y pueden no recoger aspectos específicos que pueden resultar de interés, por lo que deben de ser usadas de forma complementaria a los ítems *ad hoc*. El uso de medidas más estandarizadas permitiría una mejor comparación entre estudios y ayudaría a contextualizar la valoración obtenida en un trabajo específico.

c. Señal EEG

A pesar de que el objetivo de esta tesis queda principalmente centrado en el estudio del rendimiento ofrecido por diferentes estímulos en una ERP-BCI visual, hay ciertos aspectos relativos al análisis de la

señal EEG que pudieron ser mejorados. Algunas de estos aspectos se han ido solucionando a medida que se producía un proceso de aprendizaje en la temática; lo cual puede ser observado especialmente entre los estudios 1 y 2 frente a los estudios 3 y 4. Sin embargo, otras posibles mejoras no han sido implementadas en ninguno de los estudios que avalan la tesis y también cabe hacer autocrítica sobre ellas.

Los estudios 1 y 2 utilizaron un *script* en MATLAB diseñado por el grupo UMA-BCI para ejecutar los análisis estadísticos y visualizar la señal EEG. Sin embargo, los estudios 3 y 4 emplearon la herramienta EEGLAB para llevar a cabo estos análisis (Delorme y Makeig, 2004). El uso del EEGLAB permitió una mayor flexibilidad a la hora de analizar y mostrar la señal EEG. Además, la utilización de una herramienta usualmente empleada por la comunidad científica suele estar relacionada con una mayor documentación disponible y un mayor soporte en caso de dudas. Asimismo, el EEGLAB permite llevar a cabo numerosos tipos de análisis y aplicar técnicas de filtrado para la limpieza de la señal EEG. Estas características más avanzadas del EEGLAB no han sido utilizadas en ninguno de los cuatro estudios, sin embargo, ya están siendo utilizadas en posteriores trabajos del grupo, como el análisis topográfico en Fernández-Rodríguez, Ron-Angevin, et al. (2021) o la técnica de filtrado del *artifact subspace reconstruction* en Velasco-Álvarez et al. (2021).

d. Erratas en los estudios publicados

A continuación, se mencionarán aquellas erratas halladas en las publicaciones que avalan la presente tesis doctoral. Estas erratas han sido encontradas en los estudios 1, 2 y 3. Por un lado, en el estudio 1, la figura 2 de dicho trabajo indica que se ha utilizado como medida de dispersión la desviación estándar, pero es incorrecto, se empleó el error estándar. Como norma general, la desviación estándar es empleada en texto y tablas, mientras que el error estándar es utilizado en las figuras. Además, aunque no es una errata como tal, es admitido que, al igual que se hizo con las variables relativas al rendimiento y a las medidas subjetivas en el apartado concerniente a la evaluación, debió introducirse y describirse el análisis relativo a la señal EEG en dicho apartado, en lugar de hacerlo directamente en la propia sección de resultados. Por otro lado, en el estudio 2, hay tres erratas que deben ser

mencionadas. En primer lugar, en la sección de resultados *online* se dice que han sido empleados tres ANOVA unifactoriales de medidas repetidas (“*three one-way repeated ANOVA*”) cuando realmente fueron cuatro, uno para cada variable dependiente (*accuracy*, *ITR*, *tiempo* y *CCPM*). En segundo lugar, en la tabla 2 falta el superíndice “a” en la columna de la condición relativa a las imágenes emocionales agradables para el P300 de la región posterior. Y, en tercer lugar, en la sección correspondiente a la adquisición de datos, se menciona que “*the amplifier settings were 0.5 and 1000 Hz for the band-pass filter, the notch filter (50 Hz) was on, and the sensitivity was 500 μV* ”, lo cual es incorrecto. El filtro paso banda aplicado en dicho estudio fue de 0.5 a 30 Hz, y la sensibilidad del amplificador de la señal EEG no fue calculada (acti-CHamp amplifier, Brain Products GmbH, Múnich, Alemania). Finalmente, en el estudio 3 se han hallado dos erratas. En primer lugar, la figura 5 de dicho trabajo muestra unos resultados ligeramente superiores a los empleados en los análisis y reportados en el texto ya que fueron posteriormente corregidos, sin la correspondiente modificación en la figura. Y, en segundo lugar, la figura 8 muestra el porcentaje de usuarios que seleccionaron cada respuesta usando como símbolo decimal la coma, cuando en la lengua inglesa hubiera sido apropiado el empleo del punto⁸.

A pesar de estas autocríticas, es defendido que los cuatro estudios que avalan la tesis doctoral, y que han sido publicados en revistas de calidad indexadas en el JCR, son contribuciones novedosas y relevantes a su campo de investigación. Asimismo, estos trabajos han presentado determinadas cuestiones que pueden dar lugar a futuras propuestas, las cuales podrían ayudar al desarrollo de ERP-BCI visuales útiles para pacientes con importantes deficiencias en sus funciones motoras.

⁸ En la presente tesis doctoral se ha optado por la utilización del punto como símbolo decimal, el cual es admitido por la Real Academia Española (RAE).

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

El objetivo de la presente tesis doctoral fue estudiar determinadas propiedades relativas a los estímulos empleados en una ERP-BCI visual. Para ello, se realizaron cuatro estudios que presentaron diferentes propuestas de configuración de interfaces, las cuales fueron exhaustivamente evaluadas usando una metodología experimental. Estos estudios dieron lugar a cuatro publicaciones en diferentes revistas indexadas en el JCR. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas a través de estos trabajos:

- Estudio 1. El uso de estímulos visuales con forma de bloque ofrece mejores resultados que el uso de letras en una ERP-BCI visual bajo el RCP. Las variables empleadas en el estudio 1 que apoyaron estos resultados fueron las siguientes: (a) rendimiento en la selección de los comandos, (b) diferencias de amplitud (μV) entre estímulos *target* y *non-target*, y (c) valoración subjetiva por parte de los usuarios.
- Estudio 2. El uso de imágenes como estímulos visuales ofrece mejores resultados que el uso de letras en una ERP-BCI visual bajo el RCP. Las variables empleadas en el estudio 2 que apoyaron estos resultados fueron las siguientes: (a) rendimiento en la selección de los comandos, (b) diferencias de amplitud (μV) entre estímulos *target* y *non-target*,

y (c) valoración subjetiva por parte de los usuarios. No obstante, cabe destacar que las condiciones con imágenes emocionales negativas recibieron una valoración subjetiva inferior en comparación a aquellas con imágenes neutras o positivas.

- Estudio 3. El efecto de mejora producido por el empleo de imágenes como estímulos visuales en una ERP-BCI visual bajo el RCP no es obtenido bajo la RSVP. Las variables empleadas en el estudio 2 que presentaron una mejora significativa entre las imágenes y las letras fueron las siguientes: (a) rendimiento en la selección de los comandos, (b) diferencias de amplitud (μV) entre estímulos *target* y *non-target*, y (c) valoración subjetiva por parte de los usuarios. Las puntuaciones en estas variables para las condiciones bajo la RSVP no mostraron diferencias significativas entre imágenes y letras.
- Estudio 4. El nivel de solapamiento espacial entre los estímulos empleados en una ERP-BCI visual se relaciona negativamente con el rendimiento del sistema. Las variables empleadas en el estudio 4 que apoyaron estos resultados fueron las siguientes: (a) rendimiento en la selección de los comandos, y (b) diferencias de amplitud (μV) entre estímulos *target* y *non-target*.

5.2. Líneas futuras

Los cuatro estudios han respondido a cuestiones concretas relativas al campo de las ERP-BCI visuales. De igual manera, estos trabajos han presentado nuevos interrogantes que podrían ser explorados por nuevas propuestas. A continuación, se desarrollarán las propuestas más relevantes que podrían significar un avance en el correspondiente campo de investigación.

- El efecto de superioridad de los bloques como estímulos en una ERP-BCI visual quedó demostrado en el estudio 1. Sin embargo, el efecto debido al empleo de estímulos de diferentes colores no fue demostrado en este estudio, llegando a obtenerse resultados contradictorios a los mostrados por Ryan et al. (2017) y Ryan et al. (2018). Por tanto, tal y como se explicó en la sección de discusión correspondiente al estudio 1 (sección 4.1.1), sería interesante que futuras propuestas explicaran esta diferencia de resultados con la finalidad de entender mejor cómo

afecta la propiedad visual del color de los estímulos en el rendimiento de una ERP-BCI visual bajo el RCP.

- El empleo de imágenes como estímulos en una ERP-BCI visual bajo el RCP ha mostrado un mejor rendimiento frente a las letras en los estudios 2 y 3. Sin embargo, debido a las características de las condiciones experimentales empleadas, estos estudios no pudieron ofrecer una explicación de este fenómeno (ver sección 4.2.a). Por tanto, una posible propuesta de trabajo podría ir dirigida a estudiar por qué el rendimiento de las imágenes es superior al de las letras. Los resultados de esta propuesta podrían acercar a la comunidad investigadora de las ERP-BCI visuales a comprender mejor qué variables, relativas a los estímulos empleados, afectan al rendimiento de estos dispositivos. Asimismo, podría resultar de interés evaluar si los hallazgos previamente realizados en el uso de las caras como estímulos visuales pudieran provocar también una mejora del rendimiento en un paradigma que utilizara imágenes como estímulos (p. ej., cambiar el color natural de la imagen representada, emplear imágenes semitransparentes, o utilizar un objeto propiedad del usuario).
- En caso de que el usuario de la ERP-BCI visual no posea control oculomotor, estos sistemas deben emplear un paradigma de presentación que no dependa de dicho control (p. ej., la RSVP). El RCP ha sido un paradigma más estudiado por la comunidad científica que la RSVP (Rezeika et al., 2018). Sin embargo, como se mostró en el estudio 3, los efectos que pueden obtenerse bajo el RCP no tienen que ser igualmente obtenidos bajo la RSVP. Esto implicaría la necesidad de comprobar si determinados hallazgos, previamente presentados bajo el RCP, pueden ser igualmente obtenidos bajo la RSVP. Algunos de estos ejemplos podrían ser los avances realizados bajo el RCP en relación a las propuestas relativas al uso de caras como, por ejemplo, cambiar el color natural de la cara representada (Q. Li et al., 2015; Zhang et al., 2021), usar caras semitransparentes (Cheng et al., 2017), o utilizar la propia cara del usuario (Z. Lu et al., 2020).
- Otra línea interesante podría ser explorar qué parámetros visoespaciales influyen en el rendimiento de una ERP-BCI visual. Como se expuso en el estudio 4, el solapamiento espacial de los

estímulos parece ser un parámetro relevante en el rendimiento. No obstante, este parámetro se encuentra en interacción con otros que también han mostrado influir en el rendimiento, tales como el tamaño de los estímulos (Kellicut-Jones y Sellers, 2018), el número de elementos disponibles (Sellers et al., 2006) o el tamaño de la superficie donde se sitúa la interfaz visual (Y. Li et al., 2011; Ron-Angevin et al., 2019)⁹. Sin embargo, los efectos de estos parámetros han sido estudiados de forma individual, es decir, sin considerar la interacción entre ellos. Por tanto, podría resultar interesante el estudio de estos parámetros en conjunto, y no sólo individualmente. Asimismo, además del estudio conjunto de estos parámetros visoespaciales, sería recomendable considerar las habilidades y necesidades de la población objetivo de estas interfaces, es decir, de aquellos pacientes con problemas motores que se vean incapacitados para controlar otro tipo de tecnología asistencial más sencilla (de un menor coste económico y que no requiera personal técnico). En definitiva, sería adecuado trabajar en la creación de un modelo general que considere todas estas interacciones para ofrecer una interfaz óptima para cada usuario.

En definitiva, el estudio de los parámetros relativos a los estímulos en una ERP-BCI es un ámbito de investigación en el que aún quedan numerosos avances por hacerse para convertirlas en una opción eficaz y eficiente para establecer un canal de comunicación entre un usuario y su entorno.

⁹ Por ejemplo, si se desea aumentar el tamaño de los estímulos empleados en una ERP-BCI visual, debe elegirse entre (a) aumentar la superficie donde se sitúa la interfaz, (b) reducir el número de elementos disponibles y/o (c) disminuir la distancia entre los estímulos.

Capítulo 6

English summary and conclusions

6.1. Summary

In this section, a summary of the dissertation presented in Spanish will be carried out, synthesising all the chapters previously stated. This section will be divided into five parts. First, an introduction to the brain-computer interface (BCI) system will be introduced (section 6.1.1). Second, the background related to the specific topic of the dissertation will be presented (section 6.1.2). Third, the studies performed to support the present doctoral thesis will be described (section 6.1.3). Fourth, the method and results of each of the studies will be reported (section 6.1.4). Finally, a brief discussion of the findings of each of the studies carried out will be presented (section 6.1.5).

6.1.1. Introduction

BCIs are a type of technology that uses the human brain signal to establish a communication channel between a user and a device (Vidal, 1973; Wolpaw et al., 2002). The main advantage of these systems is that, initially, they do not require muscular control for their use. The channel utilised by BCIs to establish communication can be obtained through different neuroimaging techniques, such as electroencephalography (EEG), near-infrared spectroscopy, functional magnetic resonance imaging, or electrocorticography (Nicolas-Alonso & Gomez-Gil, 2012; Yadav et al.,

2020). As this technology bypasses the muscular channel, it may be a suitable option to allow interaction with the environment in those patients with a completely impaired muscular channel or with an inability to use it properly.

There are several conditions that cause a deterioration in the motor skills of affected patients, such as amyotrophic lateral sclerosis (ALS) or chronic Guillain-Barré syndrome (Kiernan et al., 2011; Willison et al., 2016). These conditions can result in serious difficulty for the patient to interact with his/her environment. To solve this problem, assistive technology—including BCIs—serves as a tool to facilitate the user's interaction with the environment (Alper & Raharinirina, 2006). This assistive technology can be used for multiple situations, such as controlling a wheelchair, domotic devices, or an augmentative and alternative communication system (AACs) (Jamwal et al., 2020). The critical point of assistive technology is to be adapted to the patient's abilities.

There are conditions that can result in a locked-in state (LIS), a state in which the person maintains only eye movements, albeit limited in some patients, and blinks (Love & Biller, 2007). This state could still allow the use of some types of assistive technologies (e.g., simple systems based on eye tracking or electrooculography). However, such motor execution may not be stable and require great effort on the part of the patient, resulting in a negative experience during their attempt to get control (Spataro et al., 2014). Therefore, the need to use assistive technology that requires as little motor capacity as possible, such as BCIs, is desirable.

The most popular BCIs are those based on event-related potentials (ERP). ERPs are defined as changes in EEG signal voltage, in the time domain, related to a sensory, motor or cognitive event (Kappenman & Luck, 2012). ERPs used by BCIs are evoked by a sensory event, i.e., the presentation of an external stimulus. In an ERP-based BCI (ERP-BCI), different sensory modalities can be used to trigger an evoked potential: visual, auditory, and tactile. If the user can properly operate the visual channel, visual ERP-BCIs have shown the best performance compared to the other modalities (Allison et al., 2020; Nicolas-Alonso & Gomez-Gil, 2012; Rezeika et al., 2018). However, visual ERP-BCIs require the user to have the ability to be attentive to a graphical interface. In a visual ERP-BCI, stimuli appear on the screen, and the user must pay attention to the one he/she desires to select (target stimulus). Generally, the task used to select the stimulus is supported by mentally counting the number of times the target stimulus appears. Each time

the target stimulus is presented on the screen, it will provoke an ERP that will be detected by the system, which will allow its selection. Despite the previously mentioned requirement, the visual ERP-BCIs have shown promising results in users with severe muscle control problems, such as patients affected by ALS or Duchenne muscular dystrophy (e.g., Ron-Angevin et al. (2019) and Utsumi et al. (2018)), and even in the LIS condition (Sellers et al., 2014). Therefore, these systems may be considered a suitable technology for those patients who preserve their visual channel. The selection of a type of assistive technology based on this channel (e.g., visual ERP-BCI or eye tracking system) will depend on the user's preferences and abilities (García et al., 2017; Pasqualotto et al., 2015).

The proposals presented by the scientific community based on a visual ERP-BCI have been diverse. However, the most widely used applications have been spellers, a type of AACs that enables verbal communication through individual letter selection on a graphical interface (see Rezeika et al., 2018 for an extensive review on spellers based on BCI systems). The present dissertation will remain focused on the study of these devices. However, there is no impediment to why the advances shown cannot be applied to the control of other devices, such as the control of a domotic system or a wheelchair (Corralejo et al., 2011; Iturrate et al., 2009).

Visual ERP-BCI is a technology that still has a significant path to improve further to enable its use outside laboratories, such as hospitals or the patient's home. Some aspects that can be improved to enable this step are the following: (a) technical knowledge required, (b) economic cost, and (c) performance. Currently, efforts are being made to facilitate the accessibility of this technology and minimise the need for technical knowledge for its use (Velasco-Álvarez et al., 2019). In relation to the relatively high economic cost, numerous studies have been focused on evaluating the performance of low-cost devices to assess their feasibility in future patients (Fontanillo Lopez et al., 2020). However, where the scientific community is investing more effort is in addressing the third issue, specifically, in improving the performance of users by controlling a visual ERP-BCI, being the focus of the present dissertation.

6.1.2. Previous background

The present dissertation has focused on the use of an ERP-BCI based on the visual modality. These systems have been extensively studied. Examples of studies include presentation paradigms (e.g., Townsend et al. (2010) and Treder et al. (2011)), times relative to stimulus presentation (e.g., J. Lu et al. (2013) and M. Li et al. (2021)), stimulus sizes (e.g., Y. Li et al. (2011) and Kellicut-Jones & Sellers (2018)) or types of stimuli presented (e.g., Kaufmann et al. (2011) and Ma & Qiu (2017)). Specifically, the present dissertation aims to study the visual stimuli used in a visual ERP-BCI. Stimuli are those interface elements that must be attended by the user for which the system executes a certain command. The ERP waveform can be affected by the type of stimuli used (Wang et al., 2012). It is, therefore, desirable to use this ability of visual stimuli to modulate ERPs to facilitate the discrimination between target versus non-target stimuli and, therefore, to improve the performance of a visual ERP-BCI.

The most commonly used visual stimuli in a speller controlled through a visual ERP-BCI are white letters (Rezeika et al., 2018). However, other paradigms have used different visual stimuli, such as geometric figures, pictograms or faces (Inada & Tanaka, 2011; Kaufmann et al., 2011; Ma & Qiu, 2017). Currently, faces have been one of the most employed stimuli due to their contribution to the high performance obtained in an ERP-BCI. These stimuli have been tested with different variations: the face of a famous person in green (Q. Li et al., 2015), the participant's self-face (Z. Lu et al., 2020) or a semitransparent face that allowed seeing the background letter in the matrix (Cheng et al., 2017). These works are supported by the fact that the use of faces as visual stimuli evokes specific ERPs. The potentials most associated by the literature with this face processing are N170 and N400 (Olivares et al., 2015). By adding more variation to the electroencephalographic (EEG) signal waveform—besides the P300 potential typical of an ERP-BCI—the use of faces as visual stimuli could help to more effectively discriminate target versus non-target stimuli. These proposals seem to indicate the importance of considering the cognitive impact of the visual stimuli presented. Thanks to these stimuli, it is possible to modulate the amplitude of some of the ERPs and thus improve the classifier performance of the EEG signal.

Several studies outside the BCI field have shown how emotionally charged stimuli lead to an increase in the amplitude of certain ERP signal

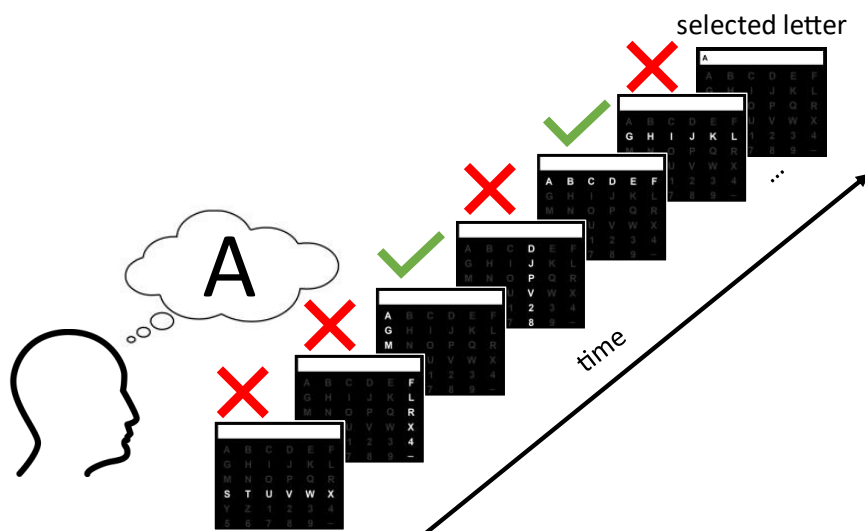


Figure 22. Schematic operation of a standard row-column paradigm adapted to a brain-computer interface that allows the selection of letters. In the example shown, the user intends to select the letter A, therefore, he/she will have to pay attention to the white appearance of this letter in order the system finally selects it.

components, such as the P300 and the late positive potential (LPP) (see the works of Olofsson et al. (2008) and Hajcak et al. (2010) for a comprehensive review of the topic). Therefore, in the UMA-BCI group, it was decided to conduct a preliminary study (only four participants and no statistical analyses involved) to explore whether the application of a paradigm with emotional stimuli could improve performance—in a visual ERP-BCI using a standard row-column paradigm (RCP) (figure 22)—due to an amplification of potentials related to emotionally charged pictures (Fernández-Rodríguez et al., 2018). To test this potential effect, that work presented the following conditions varying the type of stimulus used: white letters, coloured letters, white blocks, coloured blocks, pictures that did not elicit an emotional response (neutral pictures), pictures that elicited a strong positive emotional response (positive pictures), and pictures that elicited a strong negative emotional response (negative pictures). The blocks conditions were added to control that the positive effect of the pictures was not due to their larger size compared to the illumination of the letter alone (Speier et al., 2017); the coloured letters and coloured blocks were added to control that the effect of

the pictures was not due to the use of a different picture for each letter (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018); finally, neutral pictures were added to test whether the effect of the emotional pictures was due to the properties of the pictures to elicit an emotional response, as previously shown in the non-BCI literature (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). The results of this preliminary work indicated that three levels could be established according to the performance (accuracy) obtained (figure 23): (a) regardless of their emotional category, pictures performed better than letters and blocks, (b) both coloured and white blocks performed better than letters (coloured blocks performed slightly better than white blocks), and (c) letters performed worst (white letters performed slightly better than coloured letters).

According to this preliminary study, it appears that the effect of stimulus size (pictures and blocks over letters) and applying more complex stimuli in terms of meaning or visual composition (pictures over blocks) could improve the performance of a visual ERP-BCI in the RCP. The hypothesis of heterogeneity between stimuli was not fulfilled, as the superiority of coloured

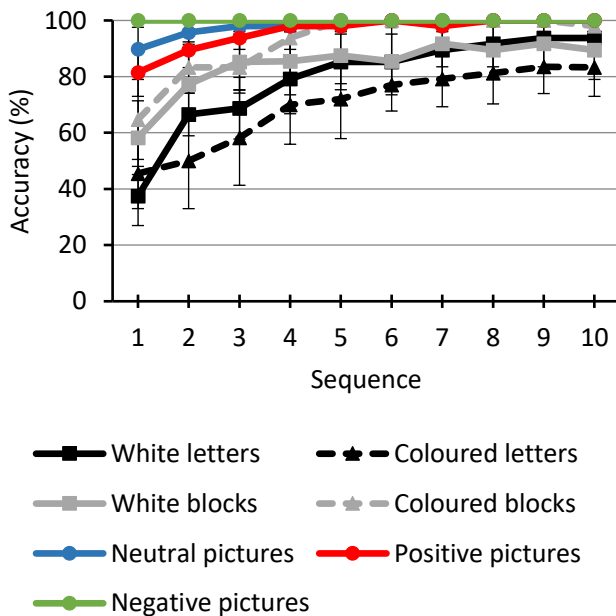


Figure 23. Accuracy (%) (mean $\pm$ standard error) obtained in each sequence for each of the conditions in Fernández-Rodríguez et al. (2018).

letters and blocks versus white letters and blocks was not very consistent. Likewise, the effect of the emotional stimuli was not convincing either, since a possible improvement produced by the negative pictures was noticed, but not by the positive ones, being the neutral ones located in the middle of both. These results could indicate that only negative emotional stimuli could increase performance or that the differences between conditions with pictures are due to the randomness. In short, due to the possible effects found, it was considered convenient to continue this line of research, which ended up giving rise to the four papers that support the present dissertation and are introduced in the following section.

6.1.3. Studies supporting the thesis

As indicated in the previous section, the study of the specific characteristics of a graphical interface in the field of visual ERP-BCIs is a relatively recent and productive area of research, in which there are many proposals yet to be investigated. Therefore, it is appropriate that the specific subject of this doctoral thesis, within the BCI, was to study some of the visual properties of the stimuli in a visual ERP-BCI. This dissertation will be supported by four papers published in journals indexed in the Journal Citation Reports (JCR) (Fernández-Rodríguez et al., 2020; Fernández-Rodríguez, Medina-Juliá, et al., 2021; Fernández-Rodríguez, Velasco-Álvarez, et al., 2019b, 2019a). In this section, the mentioned works will be introduced, presenting their goal, main hypotheses (those related to performance), and the novelty they bring to the field of ERP-BCIs based on visual stimuli.

The methodology of these studies was experimental since the variables under study were controlled, keeping the rest of them constant or randomised among the different conditions. Most of the participants were university students between 18 and 26 years old, and they received monetary compensation for their collaboration. Participants were not familiar with the BCI field and were not aware of the objectives of the studies before their participation. Likewise, all of them declared that they had no history of recent (5 years) neurological or psychiatric disease, nor were they taking any type of medication on a regular basis.

a. Study 1

Fernández-Rodríguez, Álvaro, Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., & Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of flashing stimuli shape and colour heterogeneity using a P300 brain-computer interface speller. *Neuroscience Letters*, 134385.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134385>

The first study aimed to jointly evaluate the effects of two factors that were previously reported by other works individually. These effects were related to the type of visual stimulus employed in a visual ERP-BCI: (a) the use of block-shaped stimulus illumination (a solid rectangle with the letter inside) versus standard letter illumination leads to improved performance (Speier et al., 2017), and (b) the use of different coloured (i.e., heterogeneous) illumination also increases performance (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018). The conditions used in this study employed the following visual stimuli: white letters, coloured letters, white blocks, and coloured blocks. The novelty of this work lay in combining the study of both variables, the heterogeneity and the shape of the stimuli.

- Hypothesis 1. Block-shaped visual stimuli will perform better than letters in a visual ERP-BCI.
- Hypothesis 2. Heterogeneous stimuli (colours) will perform better than homogeneous stimuli (white) in a visual ERP-BCI.
- Hypothesis 3. Both factors will have an additive effect on the performance of a visual ERP-BCI.

b. Study 2

Fernández-Rodríguez, Ávaro, Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., & Ron-Angevin, R. (2019). Evaluation of emotional and neutral pictures as flashing stimuli using a P300 brain-computer interface speller. *Journal of Neural Engineering*, 16(5).
<https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab386d>

The second study aimed to evaluate the use of emotional pictures (i.e., those with the ability to elicit an emotional response) to improve the performance of an ERP-BCI. The primary theoretical support for this proposal came from those previous studies, outside the field of BCI, that showed an increase in the amplitude of certain potentials (e.g., the P300 or the LPP) due to the visualisation of emotional imagery (Hajcak et al., 2010; Olofsson et al., 2008). The conditions employed in this study used the following visual stimuli: white letters, pictures that did not elicit an emotional response (neutral pictures), pictures that elicited a strong positive emotional response (positive pictures), and pictures that elicited a strong negative emotional response (negative pictures). The novelty of this work lay in the use of three experimental conditions with pictures with different emotional charge (neutral, positive or negative) as stimuli in a visual ERP-BCI.

- Hypothesis 1. Pictures will perform better than letters as stimuli in a visual ERP-BCI.
- Hypothesis 2. Emotional pictures will perform better than neutral pictures as stimuli in a visual ERP-BCI.

c. Study 3

Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2021). Different effects of using pictures as stimuli in a P300 brain-computer interface under rapid serial visual presentation or row-column paradigm. *Medical & Biological Engineering & Computing*. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02340-y>

The third study aimed to evaluate whether the performance improvement produced using pictures under the RCP was also found under an RSVP paradigm. Due to the good results obtained in study 2, i.e., the positive performance of pictures as stimuli for a visual ERP-BCI, it was decided to conduct a preliminary study comparing the enhancement effect of pictures under RCP versus a paradigm that would not require ocular control, specifically, the one based on rapid serial visual presentation (RSVP) (Fernández-Rodríguez, Medina-Juliá, et al., 2019). That preliminary work confirmed that the effect of pictures

under RCP improved performance but not under RSVP. Therefore, it was considered appropriate to conduct a new study to further evaluate (e.g., a larger sample, a more detailed analysis of the results, an interface that allowed a larger number of commands, and inclusion of an online phase) this possible difference between paradigms. The factors under study in this work were the presentation paradigm (RCP and RSVP) and the visual stimuli (letters and pictures). To study these factors, the conditions used were as follows: letters under the RSVP, pictures under the RSVP, letters under the RCP, and pictures under the RCP. The novelty of this work lay in the combined study of the effect of pictures under the RCP and a paradigm based on the RSVP through a multifactorial design (2×2).

- Hypothesis 1. RCP will perform better than the RSVP paradigm.
- Hypothesis 2. The enhancement effect produced using pictures will be stronger in RCP compared to the one produced in RSVP (interaction effect between the presentation paradigm and the stimuli).

d. Study 4

Fernández-Rodríguez, Álvaro, Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2020). Effects of spatial stimulus overlap in a visual P300-based brain-computer interface. *Neuroscience*, 431, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.02.011>

The fourth study aimed to assess whether the overlap between stimuli presented in a visual ERP-BCI could affect its performance. Study 3 showed that using pictures as stimuli, the performance of an RSVP paradigm did not benefit in the same way as the RCP. One of the main differences between RCP and an RSVP paradigm is the distance between stimuli. In Won et al. (2018), it was shown that an RSVP-like paradigm with the stimuli slightly displaced from the centre presented higher performance versus a classical RSVP condition with the visual stimuli all placed in the same position. The distance between the stimuli was so small that it required some level of overlap between them. The novelty of this work lay in testing conditions with different levels of

overlap between stimuli (100%, 66.67%, 33.33%, and 0%) to examine the impact on the performance of an RSVP-based ERP-BCI.

- Hypothesis 1. A higher level of overlap between stimuli in a visual ERP-BCI will decrease performance.

6.1.4. Method and results

This section will briefly describe, for each of the studies, how each of the hypotheses presented above were tested, as well as the obtained results. Refer to the published articles for a more detailed description of these results.

a. Study 1

To accomplish the purpose of individually and jointly evaluating the effect of the two factors related to the stimuli (shape and colour heterogeneity), a factorial design (2×2) was carried out with four conditions that were controlled by 15 participants: white letters, coloured letters, white blocks, and coloured blocks. This work used the following dimensions for assessment: (a) the performance in the calibration (*accuracy*) and online tasks (*accuracy*, *time* required to complete the task, and *correct commands per minute*); (b) the waveform of the EEG signal, using the *amplitude difference* (μV) in absolute value between target and non-target stimuli in the time interval 200-600 ms after stimulus onset as a parameter; and (c) the following subjective variables, subjective perception of performance (*performance*), difficulty in maintaining attention on the interface (*attention*), mental effort required to control the system (*mental effort*), level of comfort (*comfort*), level of frustration (*frustration*), and level of overall satisfaction with the interface (*satisfaction*).

The work concluded with the confirmation of hypothesis 1, i.e., block stimuli improved performance compared to letters. This effect has been supported by the results of the EEG signal analysis, in which block conditions presented the largest amplitude differences. This should facilitate the classification between target and non-target stimuli. On the other hand, the effect of colour heterogeneity has not been replicated, so hypothesis 2 was rejected. Since the effect of colour

heterogeneity has been shown in previous works (Ryan et al., 2017; Ryan et al., 2018), it should be studied further to determine what other interface factors may modulate it (e.g., the presentation paradigm or the number of stimuli). Finally, since hypothesis 2 was rejected, hypothesis 3 could not be accepted either since it referred to an additive effect of both factors on performance. The subjective measures only showed significant differences for the satisfaction variable, in which the colour block condition was rated higher than the colour letter condition. In short, in this work, it could be concluded that the factor related to the shape of the stimulus was the only one that influenced the performance of the visual ERP-BCI.

- ✓ Hypothesis 1. Block-shaped visual stimuli will perform better than letters in a visual ERP-BCI.
- ✗ Hypothesis 2. Heterogeneous stimuli (different colours) will perform better than homogeneous stimuli (white) in a visual ERP-BCI.
- ✗ Hypothesis 3. Both factors will have an additive effect on the performance of a visual ERP-BCI.

b. Study 2

To test the hypotheses regarding the use of pictures on the performance of a visual ERP-BCI, four conditions were evaluated with different stimuli controlled by 23 participants: white letters, neutral pictures (low level of activation and valence), positive pictures (high level of activation and positive valence), and negative pictures (high level of activation and negative valence). This work employed the following dimensions for the evaluation of the results: (a) the performance in the calibration (*accuracy*, *ITR*) and online tasks (*accuracy*, *ITR*, *time* required to complete the task, and *correct commands per minute*); (b) the waveform of the EEG signal, taking as a parameter the amplitude difference (μV) in the EEG signal between target and non-target stimuli at different ERPs (P1, N1, P2, N2, P300, and LPP); and (c) the following subjective variables, subjective perception of performance (*performance*), difficulty in maintaining attention on the interface (*attention*), mental effort required to control the system (*mental effort*), level of pleasure (*pleasure*), level of

frustration (*frustration*), and level of overall satisfaction with the interface (*satisfaction*).

In summary, this work showed clear superiority of all sets of pictures over letters in terms of performance. Therefore, hypothesis 1 was accepted. Likewise, most ERPs (anterior P1, anterior N1, posterior P2, anterior and posterior N2, anterior and posterior P300, and anterior LPP) also showed significant differences between at least some of the conditions with pictures versus those with letters. On the other hand, the effect of stimulus emotionality was not found on performance, which implies the rejection of hypothesis 2 of the study. However, in the EEG signal, significant differences were found in the posterior P300 between the condition with neutral pictures versus the condition with negative pictures, as well as in the anterior LPP between the condition with neutral pictures versus the two conditions with emotional pictures (positive and negative). In reference to the subjective variables, the conditions with neutral and positive pictures were the best rated. However, it should be noted that the set of positive pictures chosen, with a high level of activation, might not be appropriate for certain contexts since most of the selected pictures presented nudity.

- ✓ Hypothesis 1. Pictures will perform better than letters as stimuli in a visual ERP-BCI.
- ✗ Hypothesis 2. Emotional pictures will perform better than neutral pictures as stimuli in a visual ERP-BCI.

c. Study 3

To evaluate the effect of the stimuli in each presentation paradigm, a factorial design (2×2) was conducted with four conditions that were controlled by 16 participants: letters under the RSVP (L-RSVP), pictures under the RSVP (P-RSVP), letters under the RCP (L-RCP), and pictures under the RCP (P-RCP). This study employed three dimensions to evaluate the results obtained: (a) the performance, through the *accuracy* and *ITR* in a calibration phase and another online phase; (b) the waveform of the EEG signal, through the study of its *amplitude* (μV) at each instant from 0 to 800 ms from stimulus presentation; and (c) the following subjective variables, level of effort required to perform the task correctly (*effort*), level of fatigue produced

by the interface control (*fatigue*), selection of the preferred stimulus (*preferred stimulus*), selection of the preferred paradigm (*preferred paradigm*), and selection of the *favourite condition*.

On the one hand, it can be stated that the RCP conditions performed better than those based on the RSVP paradigm. Therefore, hypothesis 1 of the study was confirmed. On the other hand, pictures as stimuli in a visual ERP-BCI had a different effect on performance depending on the presentation paradigm employed. Specifically, this effect is notably more beneficial under RCP since, under RSVP, it was barely observed. Therefore, hypothesis 2 of the study was also accepted. This interaction effect was corroborated by EEG signal analyses, as well as by user preferences, in which even the P-RSVP condition obtained the worst scores. The overall results of this work were particularly interesting as they prove that previous findings made in relation to stimuli under RCP—the most used paradigm to date—may not be suitable for other paradigms, such as the RSVP-based one, which is more suitable for patients with oculomotor deficits.

- ✓ Hypothesis 1. RCP will perform better than the RSVP paradigm.
- ✓ Hypothesis 2. The enhancement effect produced using pictures will be stronger in RCP compared to that produced in RSVP (interaction effect between the presentation paradigm and the stimuli).

d. Study 4

To evaluate the possible effect of overlap between stimuli, four conditions were tested under the RSVP paradigm with different levels of overlap that were controlled by 19 participants: 0%, 33.3%, 66.7%, and 100%. This study used two dimensions to evaluate the results obtained: (a) the performance, through the *accuracy* in a calibration phase; and (b) the waveform of the EEG signal, through the study of its *amplitude* (μV) at each instant from -200 to 800 ms from stimulus presentation for target and non-target stimuli.

This work showed how, as the visual stimuli (targets and non-targets) presented a higher level of overlap, the *amplitude* of the non-

target stimuli was greater, leading to a decrease in the *amplitude* difference with respect to the targets. A smaller *amplitude* difference between stimuli was associated with lower classifier performance. Therefore, those conditions with a lower level of overlap exhibited higher performance, confirming hypothesis 1 of the study. These results could be interpreted as a greater difficulty for participants to ignore non-target stimuli when they were more spatially overlapped to target stimuli. Most previous work has focused on enhancing the stimulus to be attended (target) to make the ERP components associated with those stimuli as recognisable as possible, as in studies 1 and 2 of the present dissertation. However, to produce a performance improvement under the RSVP paradigm, where the stimuli are completely overlapping, this approach may be incomplete since the *amplitude* of the EEG signal corresponding to the non-target stimulus is also increased. This overlap in RSVP could be one of the possible causes justifying why no beneficial effect was observed using pictures under RSVP in study 3. Therefore, it becomes clear that in those paradigms with a high level of overlap (such as RSVP), it could be appropriate to use strategies that, besides considering the *amplitude* of the target stimulus, consider the amplitude of the non-target stimulus.

- ✓ Hypothesis 1. A higher level of overlap between stimuli in a visual ERP-BCI will decrease performance.

6.1.5. Discussion

This section will discuss the results obtained, contextualising them with previous literature. Besides, specific questions that the studies supporting the doctoral thesis may have left open will be raised. Special emphasis will be placed on the results related to performance. Some of the points mentioned were already exposed in the publications that support the present dissertation. However, this section will update these points with findings from subsequent publications, from those that support the thesis and others.

a. Study 1

The first study showed how the illumination of block-shaped stimuli provided better results than illumination of letters. These results corroborated what was found in other studies where the size of the

illuminated stimuli could be a variable that improved the performance of a visual ERP-BCI (Kellicut-Jones & Sellers, 2018; Speier et al., 2017). However, study 1 did not present any enhancement effect associated with colour-related heterogeneity for any of the stimuli (letters or blocks) nor in any of the study phases (calibration or online). It is interesting to note that the coloured letters condition showed the worst performance, something that was also obtained in the preliminary study (Fernández-Rodríguez et al., 2018). These results are opposite to those previously obtained by Ryan et al. (2017) and Ryan et al. (2018), where illumination of letters in different colours offered better performance versus homogeneous illumination of letters in white. Considering that the results found by the UMA-BCI group have been obtained both in the preliminary study (Fernández-Rodríguez et al., 2018) and in study 1, it is unlikely that they are due to chance. Therefore, it is reasonable to think that, in these last two works, there is a cause to explain why the condition of the coloured letters was the worst. Some of the possible reasons to explain why these results are different from those in the papers by Ryan et al. (2017) and Ryan et al. (2018) were outlined in study 1. Among these explanations might be the larger matrix size in the Ryan et al. papers and the use of a slightly different illumination paradigm. While the proposal of study 1 used a 3×4 matrix and was based on a classical RCP, the articles of Ryan et al. (2017) and Ryan et al. (2018), an 8×9 matrix was used based on the checkboard paradigm (Townsend et al., 2010). In this last paradigm, the illuminations were not performed by rows and columns (as the RCP) but by pseudo-randomised sets. This difference in results between papers raises the study of which factors are causing the reversal of the enhancement effect produced by heterogeneous colour illumination in Ryan et al. (2017) and Ryan et al. (2018).

b. Study 2

The second study showed clear superiority of the use of pictures versus the use of letters as stimuli in a visual ERP-BCI. More specifically, the main novelty of the study was the high performance of the conditions with pictures, reaching an accuracy of 99.64% and an ITR of 46.07 bits/min in the online phase for the condition that used positive emotional stimuli. As discussed in the article, the results obtained by the picture conditions are comparable to those obtained

using face stimuli, which are becoming more relevant in recent years for visual ERP-BCI (e.g., Z. Lu et al. (2020), S. Li et al. (2020), and Zhang et al. (2021)). However, due to the specific differences between the interfaces of different works, a fair comparison between them is not possible. However, two relatively recent works compared the use of faces versus other types of images. On the one hand, Kellicut-Jones & Sellers (2018) conducted a study where the conditions employed either a face (Albert Einstein) or a non-recognisable pixelated picture as a stimulus. The results of that work showed that the type of stimulus used did not produce significant differences in performance. On the other hand, Jones & Sellers (2019) compared the performance associated with the use of different types of stimuli: a face (Albert Einstein) versus a location (The White House), and the latter versus a tool (a hammer). In neither of the two comparisons—face vs location and location vs tool—significant differences were obtained. Therefore, these studies seem to indicate that there is no difference between the use of faces or other types of images as stimuli in a visual ERP-BCI. Nevertheless, as anticipated, the current trend of studies has continued with the use of faces.

Several works have evaluated different parameters related to the use of faces in a visual ERP-BCI. Examples of parameters that have improved the performance of these systems include the following: (a) the use of green faces versus those of a natural colour (Q. Li et al., 2015), (b) the use of semitransparent versus opaque faces (Cheng et al., 2017), or (c) the use of the participant's face versus the face of a celebrity (Z. Lu et al., 2020). It would be interesting for future studies to assess whether an adaptation of these modifications would also lead to improved performance in a paradigm using other types of pictures as stimuli (e.g., changing the natural colour of the depicted image, semitransparent images, or the use of a user-owned object). One of the main advantages of using pictures compared to faces is that they allow a direct relationship to be established between the stimulus and the command that the user wants to select (e.g., selecting an image of the glass of water in case the user wants water). This can be especially useful in RSVP-based paradigms, where the letters are not prearranged on the screen to allow the user to attend to the stimulus that overlaps the target letter.

In reference to the specific use of emotional stimuli, study 2 did not show the expected differences in the variables related to performance between the conditions with emotional and neutral pictures. Although no differences in performance were found between these conditions, significant differences were shown in some ERPs (P300 and LPP). It is possible that these differences in EEG signal were not sufficient to produce a significant difference in performance. In the paper related to this study, some possible solutions were offered to strengthen the effect of emotional pictures on the EEG signal so that they might affect performance. Some of the proposals were focused on avoiding a possible habituation effect to emotional pictures. Repeated exposure to emotional stimuli causes them to lose their ability to elicit an emotional response (Codispoti et al., 2006; Codispoti & De Cesarei, 2007). An example of a solution would have been that the interface could associate different pictures to the same letter so that the picture that appears overlapped to a particular letter would not always be the same.

In the literature related to visual ERP-BCI, no other work has been found that has tested whether stimuli specifically designed to elicit an emotional response (i.e., taken from a battery of pictures scored according to their valence and activation level, such as those employed in study 2) could increase the performance of these systems. The most closely related studies have been those that compared the use of neutral faces versus faces expressing emotion. Three such papers that deserve special mention are those of Jin et al. (2012), Zhao et al. (2011), and Jin et al. (2014). On the one hand, in Jin et al. (2012), the following visual stimuli were employed in a paradigm relatively similar to RCP¹⁰: letters, neutral faces, and smiling faces. These authors found no differences in performance between neutral and smiling faces but did find differences between both types of faces and letters¹¹. Therefore, they provided similar results to those obtained in study 2, in which pictures did not show significant differences between them but did show significant differences between sets of pictures versus letters. On the other hand, Zhao et al. (2011) employed three types of visual stimuli

¹⁰ The elements were not illuminated by rows and columns, but by pseudo-random sets.

¹¹ This work does not show statistical analyses related to the EEG signal. In the article they state that *'because this work entails numerous issues with different ERP components, we have submitted these results separately, as a companion paper'*. However, after an exhaustive search, that paper has not been found.

using the RSVP paradigm: objects, neutral faces, and faces with different emotions. This work showed significant differences between conditions in the EEG signal associated with three components: vertex-positive potential (VPP), between neutral faces and objects; LPP, emotional faces versus neutral faces and objects; and N250, neutral faces versus objects. In terms of performance, they state '*the classification performance for single trial data demonstrated the superiority of emotional faces-related ERPs applied in the oddball BCI paradigm*', but they do not provide any type of statistical analysis to support this statement (e.g., a hypothesis test offering the associated p -value). Thus, it can be claimed that the only dimension with significant differences due to the use of emotional stimuli was in the EEG signal, where the use of emotional stimuli (faces expressing an emotion) would increase the amplitude of the LPP compared to neutral stimuli (neutral faces), as in study 2. Finally, Jin et al. (2014) employed a paradigm with five available elements that were located forming a circumference and on which the stimuli to be attended by the user were presented. The conditions varied in the type of stimuli employed: a pseudo-face¹² that was presented over another slightly different pseudo-face (figure 24A), a sad face over a smiling face (figure 24B), and a neutral face over a white circle (figure 24C). All stimuli were based on drawn faces, not real faces. This work showed significant differences in performance during a calibration task, using one sequence, between the emotional faces condition versus the others, i.e., neutral faces and pseudo-faces conditions. In a subsequent online task, using two sequences, differences were only shown between the emotional face and pseudo-face conditions. Despite the significant tendency of the emotional faces condition to show the best results, this study may present a design issue to conclude that the use of emotional faces improves performance over the use of neutral faces. The conditions with faces also differed in the element on which those stimuli appeared. To claim that emotional faces improve performance over neutral faces, the starting element on which the stimuli appeared had to be similar in both conditions, e.g., a white circle. Therefore, it can be stated that, to date, it is not clear that the use of emotional stimuli improves the performance of a visual ERP-BCI. However, it is not completely ruled out that, in future work, such a performance-enhancing effect could be found considering all previous

¹² The pseudo-faces were composed of the features of a face, but disordered.

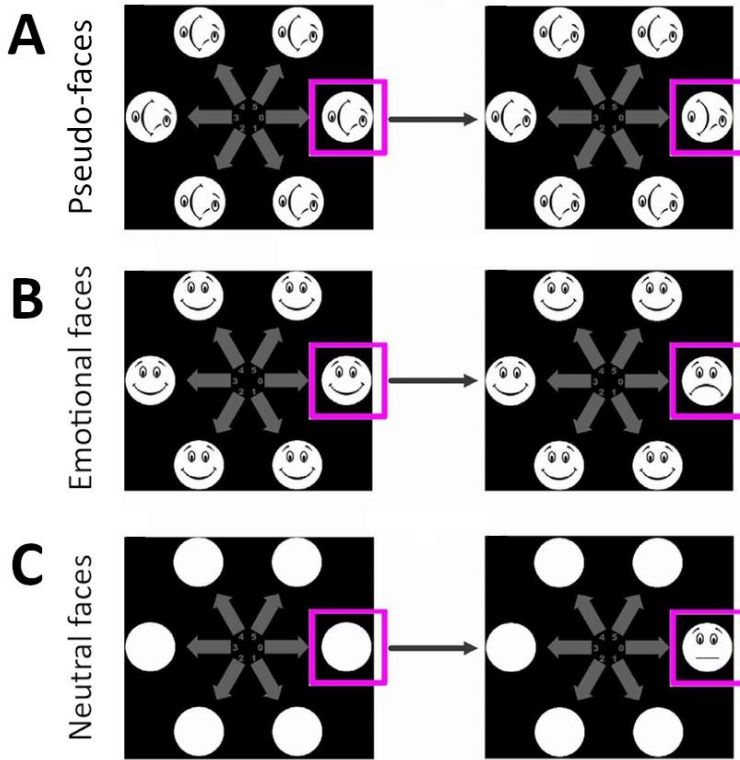


Figure 24. Each of the conditions used in Jin et al. (2014): (a) pseudo-faces, (b) emotional faces, and (c) neutral faces. The left column represents the interface with the initial elements, while the right column shows the appearance of the target stimulus over one of the previous elements.

studies on this topic, both within and outside the field of visual ERP-BCIs.

c. Study 3

Despite the high performance of the conditions with pictures in study 2 under RCP, these results could not be replicated under RSVP in study 3. Specifically, it was shown that the effect of using pictures was significantly larger under RCP than RSVP. On the other hand, as previously reported by Chennu et al. (2013), the RCP conditions showed superior performance to those based on RSVP. However, it is

recalled that RCP depends on ocular control for proper management (Brunner et al., 2010; Treder & Blankertz, 2010), not being appropriate for patients with oculomotor impairments.

The results obtained by study 3 might indicate that pictures or other alternative stimuli, such as faces, that did increase performance under RCP, compared to letters, might not increase performance under RSVP. However, numerous papers have found significant differences manipulating the type of stimulus presented in RSVP paradigms (e.g., Chen et al. (2016), Ron-Angevin et al. (2021), and Lees et al. (2020)). Thus, it is possible that the lack of significant differences in performance between letters and pictures under RSVP may be specific to pictures. In fact, in this same line of research on the use of pictures, Ron-Angevin et al. (2021) compared three types of stimuli under RSVP: letters, pictures, and faces. That study showed a significant increase in ITR due to the use of faces compared to letters in an online phase. Pictures did not show significant differences compared to faces or letters. Therefore, the results obtained in study 3 would corroborate what was obtained in Ron-Angevin et al. (2021), according to which, under RSVP, the use of pictures as visual stimuli does not show significant differences in performance compared to the use of letters. This seems to indicate that not all alternative stimuli that show an improvement in performance under RCP should also do so under RSVP. However, despite the fact that in the study by Ron-Angevin et al. (2021), no significant differences were found with respect to the performance of pictures; pictures showed a better rating, although also not significant, in each of the subjective measures (fatigue level, stress level, complexity of use, and speed of adequate presentation) compared to the face condition. Therefore, it would also not be recommended to exclude pictures for potential use under RSVP, as the user experience during system control is a factor that should also be properly considered. Another relevant, recently published, work tested three types of stimuli in a visual ERP-BCI based on RSVP: words, numbers, and images (Lees et al., 2020). The results of that study showed that words performed better (using the area under the receiver operating characteristic curve as the dependent variable) compared to the other two stimuli (numbers and pictures) when the presentation time of each stimulus had a random duration between 100 and 200 ms. Thus, it became clear that words could be an appropriate visual stimulus for a

visual ERP-BCI that did not require ocular control. Also, the use of these stimuli would present the same advantage as pictures, compared to letters or faces, since the same stimulus could be directly identified with the associated command (e.g., selecting the word 'water' if the participant desires water). Therefore, determining the most appropriate type of stimulus in a visual ERP-BCI that does not require ocular control is a line of research that still raises many questions and would therefore be interesting to exploit further.

d. Study 4

The fourth study corroborated that spatial overlap between visual stimuli in a visual ERP-BCI was associated with impaired performance. This study was conducted under a condition of full ocular mobility, so it is admitted that these results could differ in patients with restricted eye movements, which would be interesting to study in future works. However, the ability of patients to move their eyes is not an all-or-nothing question but will depend on the degree of oculomotor impairment (Sharma et al., 2011). Therefore, it may be advisable to adapt the level of overlap between stimuli (as well as the size or distance between stimuli) to the patient's oculomotor abilities. This work contributed to indicate that the poorer performance in visual ERP-BCIs with overlap between stimuli, such as those based on classical RSVP, could be due to the user's inability to ignore non-target stimuli. This conclusion was obtained after analysis of the EEG signal, in which it was observed that the amplitude of the target and non-target stimuli tended to equalise when the level of overlap between both stimuli was increased. Therefore, it might be interesting for future work to study how to decrease the attention offered to non-target stimuli in an interface that does not depend on ocular control. Likewise, the perspective of this study was mainly theoretical since it used an interface with only two available stimuli, so its results should be carefully transferred to those obtained in interfaces where the number of these stimuli is higher. However, as discussed in the study, this initial theoretical perspective was necessary to adequately control the percentage of overlap between stimuli.

In practice, the overlap between stimuli is not an isolated variable but depends on other factors that have been previously studied

individually. Some of these factors that have shown an effect on the user's experience in controlling the system are (a) the surface available to distribute the stimuli (Y. Li et al., 2011; Medina-Juliá et al., 2020; Ron-Angevin et al., 2019), (b) the size of the stimuli (Kellicut-Jones & Sellers, 2018), or (c) the number of them available (Sellers et al., 2006). The interaction between these elements should be carefully studied. For example, in a spatially constrained interface (e.g., the screen of a tablet computer) and requiring numerous stimuli, it should be decided whether it is preferred that the stimuli are larger (which could increase performance according to Kellicut-Jones & Sellers (2018)) or that they are overlapping (which would decrease performance according to study 4). Therefore, it would be important to know which of all these parameters is the most convenient to be modified (the size of the interface, the number of available commands, the size of the stimuli, or the overlap between them) without losing sight of the user's limitations and needs. In short, this example shows the importance of studying all these variables together to offer a useful visual ERP-BCI for the potential users of these devices.

6.2. Conclusions

The aim of the present doctoral thesis was to study specific properties related to the stimuli used in visual ERP-BCI. Specifically, the studies carried out have shown that (a) the use of block-shaped visual stimuli and pictures improve performance compared to the use of letters in an RCP (study 1 and study 2), (b) the improvement produced using pictures is greater in the RCP than in the RSVP (study 3), and (c) the lack of overlap between the stimuli positively influences performance (study 4). These four studies have formed a line of research that can be extended with future studies.

In case the visual channel is available, visual ERP-BCIs are the most recommended due to their better performance compared to other sensory modalities (Allison et al., 2020; Rezeika et al., 2018). However, even if the patient has the visual channel available, it is possible that he/she may have oculomotor impairments, so the selected visual interface should be adapted to the patient's capabilities. In the absence of oculomotor control, the interfaces should employ a presentation paradigm that can be controlled through covert attention (e.g., RSVP). As shown in study 3, using pictures under RCP and RSVP, the results obtained in a gaze-independent and a gaze-dependent

paradigm may be different. Thus, this would imply the necessity of questioning whether certain findings under RCP are also obtained under RSVP. Also, future work could explore how the RSVP, or other independent ocular control paradigms, may benefit from using pictures. To this end, the first step should be to understand what factors influence the performance of these systems. As discussed in study 4, stimulus overlap appears to be a relevant factor influencing performance. However, this parameter interacts with others, such as the size of the stimuli, the number of available elements or the size of the surface where the visual interface is placed. These factors have been previously studied individually in interfaces dependent on ocular control (e.g., Kellicut-Jones & Sellers (2018), Y. Li et al. (2011), Sellers et al. (2006)). Furthermore, in addition to studying these parameters individually and jointly, it would be appropriate to consider the abilities and needs of the target population of these interfaces, i.e., those patients with motor problems who are unable to control other assistive technologies (i.e., of lower economic cost and that do not require technical staff). Thus, it would be appropriate to create a general model that considers all these interactions to provide the optimal interface for each user.

In short, the study of the parameters related to stimuli in a visual ERP-BCI is a line of research in which there are still many unresolved questions to achieve an effective and efficient option for establishing a communication channel between a user and his/her environment.

Capítulo 7

Referencias

- Acqualagna, L., Treder, M. S., Schreuder, M., & Blankertz, B. (2010). A novel brain-computer interface based on the rapid serial visual presentation paradigm. *2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC'10*, 2686–2689. <https://doi.org/10.1080/15256480.2011.564491>
- Ahani, A., Moghadamfalahi, M., & Erdogmus, D. (2018). Language-model assisted and icon-based communication through a brain-computer interface with different presentation paradigms. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(9), 1835–1844. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2859432>
- Allison, B. Z., Kübler, A., & Jin, J. (2020). 30+ years of P300 brain-computer interfaces. *Psychophysiology*, 57(7), 1–18. <https://doi.org/10.1111/psyp.13569>
- Alper, S., & Raharinirina, S. (2006). Assistive Technology for Individuals with Disabilities: A Review and Synthesis of the Literature. *Journal of Special Education Technology*, 21(2), 47–64. <https://doi.org/10.1177/016264340602100204>
- Bevan, N., Carter, J., Earthy, J., Geis, T., & Harker, S. (2016). New ISO standards for usability, usability reports and usability measures. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9731, 268–278. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39510-4_25
- Brooke, J. (1996). SUS - A quick and dirty usability scale. *Usability Evaluation in Industry*, 189(194), 4–7. <https://doi.org/10.1002/hbm.20701>
- Brunner, P., Joshi, S., Briskin, S., Wolpaw, J. R., Bischof, H., & Schalk, G. (2010). Does the “P300” speller depend on eye gaze? *Journal of Neural Engineering*, 7(5), 56013. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/7/5/056013>
- Chen, L., Jin, J., Daly, I., Zhang, Y., Wang, X., & Cichocki, A. (2016). Exploring Combinations of Different Color and Facial Expression Stimuli for Gaze-Independent BCIs. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 10(January), 5. <https://doi.org/10.3389/fncom.2016.00005>
- Cheng, J., Jin, J., & Wang, X. (2017). Comparison of the BCI performance between the semitransparent face pattern and the traditional face pattern. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1323985>
- Chennu, S., Alsufyani, A., Filetti, M., Owen, A. M., & Bowman, H. (2013). The cost of space independence in P300-BCI spellers. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 10(1), 1–13.

- <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-82>
- Codispoti, M., & De Cesarei, A. (2007). Arousal and attention: Picture size and emotional reactions. *Psychophysiology*, 44(5), 680–686.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2007.00545.x>
- Codispoti, M., Ferrari, V., & Bradley, M. M. (2006). Repetitive picture processing: Autonomic and cortical correlates. *Brain Research*, 1068(1), 213–220.
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.009>
- Cohen, M. X. (2014). Introduction to the Physiological Bases of EEG. In M. X. Cohen (Ed.), *Analyzing Neural Time Series Data: Theory and Practice* (p. 0). The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9609.003.0008>
- Cohen, M. X. (2019). Preprocessing Steps Necessary and Useful for Advanced Data Analysis. In M. X. Cohen (Ed.), *Analyzing Neural Time Series Data*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9609.003.0011>
- Corralejo, R., Hornero, R., & Álvarez, D. (2011). A domotic control system using Brain-Computer Interface (BCI). In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 6691 LNCS* (Issue PART 1).
https://doi.org/10.1007/978-3-642-21501-8_43
- Das Chakladar, D., Dey, S., Roy, P. P., & Dogra, D. P. (2020). EEG-based mental workload estimation using deep BLSTM-LSTM network and evolutionary algorithm. *Biomedical Signal Processing and Control*, 60, 101989.
<https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.101989>
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21.
<https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Dijkstra, K. V., Farquhar, J. D. R., & Desain, P. W. M. (2020). The N400 for brain computer interfacing: Complexities and opportunities. *Journal of Neural Engineering*, 17(2). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab702e>
- Elsahar, Y., Hu, S., Bouazza-Marouf, K., Kerr, D., & Mansor, A. (2019). Augmentative and alternative communication (AAC) advances: A review of configurations for individuals with a speech disability. *Sensors (Switzerland)*, 19(8). <https://doi.org/10.3390/s19081911>
- Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510–523.
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2019). Preliminary Results Using a P300 Brain-Computer Interface Speller: A Possible Interaction Effect Between Presentation Paradigm and Set of Stimuli. In I. Rojas, G. Joya, & A. Catala (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 11506 LNCS* (pp.

- 371–381). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20521-8_31
- Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2020). Effects of spatial stimulus overlap in a visual P300-based brain-computer interface. *Neuroscience*, 431, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.02.011>
- Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2021). Different effects of using pictures as stimuli in a P300 brain-computer interface under rapid serial visual presentation or row-column paradigm. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 59(4), 869–881. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02340-y>
- Fernández-Rodríguez, Á., Ron-Angevin, R., Sanz-Arigitá, E. J., Parize, A., Esquirol, J., Perrier, A., Laur, S., André, J. M., Lespinet-Najib, V., & Garcia, L. (2021). Effect of distracting background speech in an auditory brain-computer interface. *Brain Sciences*, 11(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/brainsci11010039>
- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., & Ron-Angevin, R. (2019a). Evaluation of emotional and neutral pictures as flashing stimuli using a P300 brain-computer interface speller. *Journal of Neural Engineering*, 16(5). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab386d>
- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., Medina-Juliá, M. T., & Ron-Angevin, R. (2019b). Evaluation of flashing stimuli shape and colour heterogeneity using a P300 brain-computer interface speller. *Neuroscience Letters*, 709, 134385. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.134385>
- Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2018). Evaluation of a P300 Brain-Computer Interface Using Different Sets of Flashing Stimuli. In R. Ron-angevin (Ed.), *BRAININFO 2018 : The Third International Conference on Neuroscience and Cognitive Brain Information* (pp. 1–4). IARIA.
- Fontanillo Lopez, C. A., Li, G., & Zhang, D. (2020). Beyond Technologies of Electroencephalography-Based Brain-Computer Interfaces: A Systematic Review From Commercial and Ethical Aspects. *Frontiers in Neuroscience*, 14(December), 1–23. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.611130>
- García, L., Ron-Angevin, R., Loubière, B., Renault, L., Le Masson, G., Lespinet-Najib, V., & André, J. M. (2017). A comparison of a brain-computer interface and an eye tracker: Is there a more appropriate technology for controlling a virtual keyboard in an ALS patient? In I. Rojas, G. Joya, & A. Catala (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 10306 LNCS* (pp. 464–473). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59147-6_40
- Garrison, K. E., Crowell, A. L., Finley, A. J., & Schmeichel, B. J. (2017). Effects of prior mental effort on picture processing: An ERP investigation.

- Psychophysiology*, 54(11), 1714–1725. <https://doi.org/10.1111/psyp.12914>
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D., Strohmeier, D., Brodbeck, C., Goj, R., Jas, M., Brooks, T., Parkkonen, L., & Hämäläinen, M. (2013). MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience*, 7, 267. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00267>
- Guy, V., Soriani, M. H., Bruno, M., Papadopoulou, T., Desnuelle, C., & Clerc, M. (2018). Brain computer interface with the P300 speller: Usability for disabled people with amyotrophic lateral sclerosis. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61(1), 5–11. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2017.09.004>
- Hajcak, G., Macnamara, A., & Olvet, D. M. (2010). Event-related potentials, emotion, and emotion regulation: An integrative review. *Developmental Neuropsychology*, 35(2), 129–155. <https://doi.org/10.1080/87565640903526504>
- Hart, S. G. (2006). Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 50(9), 904–908. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In *Advances in Psychology* (Vol. 52, Issue C, pp. 139–183). [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62386-9](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9)
- Inada, H., & Tanaka, H. (2011). Fundamental study of the pictogram-scanning-BCI. *Communications in Computer and Information Science*, 174 CCIS(PART 2), 284–288. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22095-1_58
- Iturrate, I., Antelis, J. M., Kübler, A., & Minguez, J. (2009). A noninvasive brain-actuated wheelchair based on a P300 neurophysiological protocol and automated navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(3), 614–627. <https://doi.org/10.1109/TRO.2009.2020347>
- Jamwal, R., Jarman, H. K., Roseingrave, E., Douglas, J., & Winkler, D. (2020). Smart home and communication technology for people with disability: a scoping review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 0(0), 1–21. <https://doi.org/10.1080/17483107.2020.1818138>
- Jin, J., Allison, B. Z., Kaufmann, T., Kübler, A., Zhang, Y., Wang, X., & Cichocki, A. (2012). The Changing Face of P300 BCIs: A Comparison of Stimulus Changes in a P300 BCI Involving Faces, Emotion, and Movement. *PLoS ONE*, 7(11), 1–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049688>
- Jin, J., Daly, I., Zhang, Y., Wang, X., & Cichocki, A. (2014). An optimized ERP brain–computer interface based on facial expression changes. *Journal of Neural Engineering*, 11(3), 36004. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/11/3/036004>
- Jin, J., Sellers, E. W., Zhang, Y., Daly, I., Wang, X., & Cichocki, A. (2013). Whether generic model works for rapid ERP-based BCI calibration. *Journal of Neuroscience Methods*, 212(1), 94–99.

- <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.09.020>
- Jones, M. R., & Sellers, E. W. (2019). Faces, locations, and tools: A proposed two-stimulus P300 brain computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 16(3), 1–17. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaff22>
- Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2010). The effects of electrode impedance on data quality and statistical significance in ERP recordings. *Psychophysiology*, 47(5), 888–904. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01009.x>
- Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2012). ERP Components: The Ups and Downs of Brainwave Recordings. In *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. <https://doi.org/10.1093/oxfordhob/9780195374148.013.0014>
- Kaufmann, T., Schulz, S. M., Grünzinger, C., & Kübler, A. (2011). Flashing characters with famous faces improves ERP-based brain-computer interface performance. *Journal of Neural Engineering*, 8(5), 056016. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/5/056016>
- Kellicut-Jones, M. R., & Sellers, E. W. (2018). P300 brain-computer interface: comparing faces to size matched non-face stimuli. *Brain-Computer Interfaces*, 5(1), 30–39. <https://doi.org/10.1080/2326263X.2018.1433776>
- Kiernan, M. C., Vucic, S., Cheah, B. C., Turner, M. R., Eisen, A., Hardiman, O., Burrell, J. R., & Zoing, M. C. (2011). Amyotrophic lateral sclerosis. *The Lancet*, 377(9769), 942–955. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)61156-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)61156-7)
- Klem, G. H., Lüders, H. O., Jasper, H. H., & Elger, C. (1999). The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. Supplement*.
- Kriegeskorte, N., Simmons, W. K., Bellgowan, P. S., & Baker, C. I. (2009). Circular analysis in systems neuroscience: The dangers of double dipping. *Nature Neuroscience*, 12(5), 535–540. <https://doi.org/10.1038/nn.2303>
- Krusienski, D. J., Sellers, E. W., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2008). Toward enhanced P300 speller performance. *Journal of Neuroscience Methods*, 167(1), 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2007.07.017>
- Kübler, A., Kotchoubey, B., Kaiser, J., Birbaumer, N., & Wolpaw, J. R. (2001). Brain-computer communication: Unlocking the locked in. *Psychological Bulletin*, 127(3), 358–375. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.127.3.358>
- Lees, S., McCullagh, P., Maguire, L., Lotte, F., & Coyle, D. (2020). Speed of rapid serial visual presentation of pictures, numbers and words affects event-related potential-based detection accuracy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(1), 113–122. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2953975>
- Li, M., Yang, G., Liu, Z., Gong, M., Xu, G., & Lin, F. (2021). The Effect of SOA on An Asynchronous ERP and VEP-Based BCI. *IEEE Access*, 9, 9972–9981. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3050545>
- Li, Q., Liu, S., Li, J., & Bai, O. (2015). Use of a green familiar faces paradigm

- improves P300-speller brain-computer interface performance. *PLoS ONE*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130325>
- Li, S., Jin, J., Daly, I., Zuo, C., Wang, X., & Cichocki, A. (2020). Comparison of the ERP-Based BCI Performance Among Chromatic (RGB) Semitransparent Face Patterns. *Frontiers in Neuroscience*, 14(January), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00054>
- Li, Y., Bahn, S., Nam, C. S., & Lee, J. (2014). Effects of Luminosity Contrast and Stimulus Duration on User Performance and Preference in a P300-Based Brain-Computer Interface. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(2), 151–163. <https://doi.org/10.1080/10447318.2013.839903>
- Li, Y., Nam, C. S., Shadden, B. B., & Johnson, S. L. (2011). A p300-based brain-computer interface: Effects of interface type and screen size. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(1), 52–68. <https://doi.org/10.1080/10447318.2011.535753>
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 140, 44–53.
- Lotte, F., Bougrain, L., Cichocki, A., Clerc, M., Congedo, M., Rakotomamonjy, A., & Yger, F. (2018). A review of classification algorithms for EEG-based brain-computer interfaces: A 10 year update. *Journal of Neural Engineering*, 15(3). <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aab2f2>
- Love, B. B., & Biller, J. A. (2007). Neurovascular System. In C. G. Goetz (Ed.), *Textbook of Clinical Neurology: Third Edition* (Third Edit, pp. 405–434). W.B. Saunders. <https://doi.org/10.1016/B978-141603618-0.10022-0>
- Lu, J., Speier, W., Hu, X., & Pouratian, N. (2013). The effects of stimulus timing features on P300 speller performance. *Clinical Neurophysiology*, 124(2), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.08.002>
- Lu, Z., Li, Q., Gao, N., & Yang, J. (2020). The Self-Face Paradigm Improves the Performance of the P300-Speller System. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 13(January), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fncom.2019.00093>
- Luck, S. J. (2014a). A broad overview of the event-related potential technique. In *An introduction to the event-related potential technique* (Issue 2014, pp. 1–34).
- Luck, S. J. (2014b). A closer look at ERPs and ERP components. In *An introduction to the event-related potential technique* (pp. 35–70).
- Luck, S. J., & Gaspelin, N. (2017). How to get statistically significant effects in any ERP experiment (and why you shouldn't). *Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1111/psyp.12639>
- Ma, Z., & Qiu, T. (2017). Performance improvement of ERP-based brain-computer interface via varied geometric patterns. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 55(12), 2245–2256. <https://doi.org/10.1007/s11517-017-1671-5>
- Martínez-Cagigal, V., Santamaría-Vázquez, E., Gomez-Pilar, J., & Hornero, R. (2019). Towards an accessible use of smartphone-based social networks

- through brain-computer interfaces. *Expert Systems with Applications*, 120, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.11.026>
- Mathewson, K. E., Harrison, T. J. L., & Kizuk, S. A. D. (2017). High and dry? Comparing active dry EEG electrodes to active and passive wet electrodes. *Psychophysiology*, 54(1), 74–82. <https://doi.org/10.1111/psyp.12536>
- Medina-Juliá, M. T., Fernández-Rodríguez, A., Velasco-Álvarez, F., & Ron-Angevin, R. (2020). P300-Based Brain-Computer Interface Speller: Usability Evaluation of Three Speller Sizes by Severely Motor-Disabled Patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14(October), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.583358>
- Nicolas-Alonso, L. F., & Gomez-Gil, J. (2012). Brain computer interfaces, a review. *Sensors*, 12(2), 1211–1279. <https://doi.org/10.3390/s120201211>
- Olivares, E. I., Iglesias, J., Saavedra, C., Trujillo-Barreto, N. J., & Valdés-Sosa, M. (2015). Brain Signals of Face Processing as Revealed by Event-Related Potentials. *Behavioural Neurology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/514361>
- Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H., & Polich, J. (2008). Affective picture processing: An integrative review of ERP findings. *Biological Psychology*, 77(3), 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.11.006>
- Pasqualotto, E., Matuz, T., Federici, S., Ruf, C. A., Bartl, M., Olivetti Belardinelli, M., Birbaumer, N., & Halder, S. (2015). Usability and Workload of Access Technology for People with Severe Motor Impairment: A Comparison of Brain-Computer Interfacing and Eye Tracking. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 29(10), 950–957. <https://doi.org/10.1177/1545968315575611>
- Polich, J., Ellerson, P. C., & Cohen, J. (1996). P300, stimulus intensity, modality, and probability. *International Journal of Psychophysiology*, 23(1–2), 55–62. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(96\)00028-1](https://doi.org/10.1016/0167-8760(96)00028-1)
- Potter, M. C. (2018). Rapid Serial Visual Presentation (RSVP): A method for studying language processing. In *New Methods in Reading Comprehension Research*. <https://doi.org/10.4324/9780429505379>
- Reips, U. D., & Funke, F. (2008). Interval-level measurement with visual analogue scales in internet-based research: VAS generator. *Behavior Research Methods*, 40(3), 699–704. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.3.699>
- Rezeika, A., Benda, M., Stawicki, P., Gembler, F., Saboor, A., & Volosyak, I. (2018). Brain-computer interface spellers: A review. *Brain Sciences*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/brainsci8040057>
- Ron-Angevin, R., Garcia, L., Fernández-Rodríguez, A., Saracco, J., André, J. M. M., Lespinet-Najib, V., Ahn, M., Fernández-Rodríguez, Á., Saracco, J., André, J. M. M., & Lespinet-Najib, V. (2019). Impact of Speller Size on a Visual P300 Brain-Computer Interface (BCI) System under Two Conditions of Constraint for Eye Movement. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2019/7876248>
- Ron-Angevin, Ricardo, Medina-Juliá, M. T., Fernández-Rodríguez, Á., Velasco-

- Álvarez, F., Andre, J.-M., Lespinet-Najib, V., & Garcia, L. (2021). Performance Analysis With Different Types of Visual Stimuli in a BCI-Based Speller Under an RSVP Paradigm. *Frontiers in Computational Neuroscience*. <https://doi.org/10.3389/fncom.2020.587702>
- Ryan, D. B., Townsend, G., Gates, N. A., Colwell, K., & Sellers, E. W. (2017). Evaluating brain-computer interface performance using color in the P300 checkerboard speller. *Clinical Neurophysiology*, 128(10), 2050–2057. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.07.397>
- Ryan, David B., Colwell, K. A., Throckmorton, C. S., Collins, L. M., Caves, K., & Sellers, E. W. (2018). Evaluating Brain-Computer Interface Performance in an ALS Population: Checkerboard and Color Paradigms. *Clinical EEG and Neuroscience*, 49(2), 114–121. <https://doi.org/10.1177/1550059417737443>
- Sellers, E. W., Krusienski, D. J., McFarland, D. J., Vaughan, T. M., & Wolpaw, J. R. (2006). A P300 event-related potential brain-computer interface (BCI): The effects of matrix size and inter stimulus interval on performance. *Biological Psychology*, 73(3), 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2006.04.007>
- Sellers, E. W., Ryan, D. B., & Hauser, C. K. (2014). Noninvasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Science Translational Medicine*, 6(257), 1–16. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3007801>
- Sharma, R., Hicks, S., Berna, C. M., Kennard, C., Talbot, K., & Turner, M. R. (2011). Oculomotor dysfunction in amyotrophic lateral sclerosis: A comprehensive review. *Archives of Neurology*, 68(7), 857–861. <https://doi.org/10.1001/archneurol.2011.130>
- Spataro, R., Ciriaco, M., Manno, C., & La Bella, V. (2014). The eye-tracking computer device for communication in amyotrophic lateral sclerosis. *Acta Neurologica Scandinavica*. <https://doi.org/10.1111/ane.12214>
- Speier, W., Arnold, C., & Pouratian, N. (2013). Evaluating True BCI Communication Rate through Mutual Information and Language Models. *PLoS ONE*, 8(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078432>
- Speier, W., Deshpande, A., Cui, L., Chandravadia, N., Roberts, D., & Pouratian, N. (2017). A comparison of stimulus types in online classification of the P300 Speller using language models. *PLoS ONE*, 12(4), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175382>
- Squires, N. K., Squires, K. C., & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90263-1](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90263-1)
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187–1188. <https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187>
- Tadel, F., Baillet, S., Mosher, J. C., Pantazis, D., & Leahy, R. M. (2011).

- Brainstorm: A user-friendly application for MEG/EEG analysis. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/879716>
- Takano, K., Komatsu, T., Hata, N., Nakajima, Y., & Kansaku, K. (2009). Visual stimuli for the P300 brain-computer interface: A comparison of white/gray and green/blue flicker matrices. *Clinical Neurophysiology*, 120(8), 1562–1566. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.06.002>
- Townsend, G., LaPallo, B. K., Boulay, C. B., Krusienski, D. J., Frye, G. E., Hauser, C. K., Schwartz, N. E., Vaughan, T. M., Wolpaw, J. R., & Sellers, E. W. (2010). A novel P300-based brain-computer interface stimulus presentation paradigm: Moving beyond rows and columns. *Clinical Neurophysiology*, 121(7), 1109–1120. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.01.030>
- Treder, M. S., & Blankertz, B. (2010). (C)overt attention and visual speller design in an ERP-based brain-computer interface. *Behavioral and Brain Functions*, 6. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-6-28>
- Treder, M. S., Schmidt, N. M., & Blankertz, B. (2011). Gaze-independent brain-computer interfaces based on covert attention and feature attention. *Journal of Neural Engineering*, 8(6), 66003. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/8/6/066003>
- Utsumi, K., Takano, K., Okahara, Y., Komori, T., Onodera, O., & Kansaku, K. (2018). Operation of a P300-based braincomputer interface in patients with Duchenne muscular dystrophy. *Scientific Reports*, 8(1), 4–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20125-6>
- Velasco-Álvarez, F., Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T., & Ron-Angevin, R. (2021). Speech stream segregation to control an ERP-based auditory BCI. *Journal of Neural Engineering*, 18(2), 26023. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/abdd44>
- Velasco-Álvarez, F., Sancha-Ros, S., García-Garaluz, E., Fernández-Rodríguez, Á., Medina-Juliá, M. T. T., & Ron-Angevin, R. (2019). UMA-BCI Speller: an Easily Configurable P300 Speller Tool for End Users. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 172, 127–138. <https://doi.org/10.1016/J.CMPB.2019.02.015>
- Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1), 157–180. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
- Wang, C., Xiong, S., Hu, X., Yao, L., & Zhang, J. (2012). Combining features from ERP components in single-trial EEG for discriminating four-category visual objects. *Journal of Neural Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1088/1741-2560/9/5/056013>
- Willison, H. J., Jacobs, B. C., & van Doorn, P. A. (2016). Guillain-Barré syndrome. In *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)00339-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)00339-1)
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T.

- M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)
- Wolpaw, J. R., Ramoser, H., McFarland, D. J., & Pfurtscheller, G. (1998). EEG-based communication: Improved accuracy by response verification. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 6(3), 326–333. <https://doi.org/10.1109/86.712231>
- Won, D. O., Hwang, H. J., Kim, D. M., Müller, K. R., & Lee, S. W. (2018). Motion-Based Rapid Serial Visual Presentation for Gaze-Independent Brain-Computer Interfaces. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(2), 334–343. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2017.2736600>
- Yadav, D., Yadav, S., & Veer, K. (2020). A comprehensive assessment of Brain Computer Interfaces: Recent trends and challenges. *Journal of Neuroscience Methods*, 346(April), 108918. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2020.108918>
- Zhang, X., Jin, J., Li, S., Wang, X., & Cichocki, A. (2021). Evaluation of color modulation in visual P300-speller using new stimulus patterns. *Cognitive Neurodynamics*, 0123456789(Birbaumer 1999). <https://doi.org/10.1007/s11571-021-09669-y>
- Zhao, Q., Onishi, A., Zhang, Y., Cao, J., Zhang, L., & Cichocki, A. (2011). A novel oddball paradigm for affective BCIs using emotional faces as stimuli. In B. L. Lu, L. Zhang, & J. Kwok (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 7062 LNCS* (Issue PART 1, pp. 279–286). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24955-6_34
- Zickler, C., Halder, S., Kleih, S. C., Herbert, C., & Kübler, A. (2013). Brain painting: Usability testing according to the user-centered design in end users with severe motor paralysis. *Artificial Intelligence in Medicine*, 59(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2013.08.003>