

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
Escuela de Tecnología Médica



TESIS PROFESIONAL

*Para optar al título profesional de Tecnólogo Médico con mención en
Imagenología, Radioterapia y Física Médica*

*“Validez ecológica de los métodos de neuroimagen aplicados a
neurociencia del aprendizaje. Estado del arte y proyecciones”*

Alumnas: Moira Belmar Pérez, Guillian Leiton Meriño

Tutor: Prof. Patricio Riquelme Contreras

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser la del tutor, Patricio Riquelme Contreras.

Firma

Fecha: 21 de Julio de 2022

ACTA CURSO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

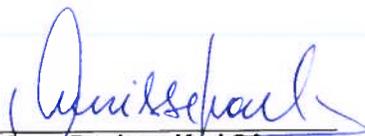
La **Srta. Moira Andrea Belmar Perez**, estudiante de Tecnología Médica con Mención Imagenología, Radioterapia y Física Médica, cumpliendo con los requisitos establecidos en el plan de estudio, realizó durante el noveno semestre de la carrera, la Tesis Profesional titulada: **“Validez ecológica de los métodos de neuroimagen aplicados a neurociencia del aprendizaje. Estado del arte y proyecciones”**, dirigida por el **Prof. Patricio Riquelme C.**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile.

La Escuela de Tecnología Médica designó para su corrección una Comisión integrada por: **Prof. TM. Cristián Garrido** y la **Prof. TM. Sandra Araya**, ambos académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile

La calificación obtenida se detalla a continuación:

Corrector 1 TM. Cristián Garrido	6.24	25%
Corrector 2 TM. Sandra Araya	5.97	25%
Tutor(es) Guía:		
Evaluación intermedia	7.00	25%
Nota final tutor	7.00	25%
Nota final tesis profesional	6.55	

En consecuencia la estudiante **Moira Andrea Belmar Perez** aprueba satisfactoriamente la asignatura.



Prof. Denisse Karl Sáez
Coordinador(a) curso
Trabajo de Investigación



Prof. Hernán Torres Rivera
PEC curso
Trabajo de Investigación

ACTA CURSO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

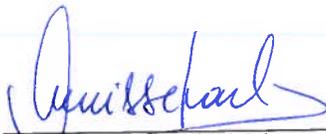
La **Srta. Guillian Yazmín Leiton Meriño**, estudiante de Tecnología Médica con Mención Imagenología, Radioterapia y Física Médica, cumpliendo con los requisitos establecidos en el plan de estudio, realizó durante el noveno semestre de la carrera, la Tesis Profesional titulada: **“Validez ecológica de los métodos de neuroimagen aplicados a neurociencia del aprendizaje. Estado del arte y proyecciones”**, dirigida por el **Prof. Patricio Riquelme C.**, académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile.

La Escuela de Tecnología Médica designó para su corrección una Comisión integrada por: **Prof. TM.Cristián Garrido** y la **Prof. TM. Sandra Araya**, ambos académico del Departamento de Tecnología Médica, Facultad de Medicina de la Universidad de Chile

La calificación obtenida se detalla a continuación:

Corrector 1 TM.Cristián Garrido	6.24	25%
Corrector 2 TM. Sandra Araya	5.97	25%
Tutor(es) Guía:		
Evaluación intermedia	7.00	25%
Nota final tutor	7.00	25%
Nota final tesis profesional	6.55	

En consecuencia la estudiante **Guillian Yazmín Leiton Meriño** aprueba satisfactoriamente la asignatura.



Prof. Denisse Karl Sáez
Coordinador(a) curso
Trabajo de Investigación



Prof. Hernán Torres Rivera
PEC curso
Trabajo de Investigación

Dedicatoria

Para las estrellas más brillantes de mi microcosmos.

*“We are no longer small
just as the universe expands
our universe will last forever”.*

-Guillian

Para mi familia, quienes creyeron en mí en todo momento.

*“You can’t fly
if you never try”.*

-Moira

Agradecimientos

A nuestras familias,
por su apoyo y amor incondicional.

Al profesor Iván Plaza Rosales,
por compartimos su perspectiva y experiencia.

A nuestro tutor, Patricio Riquelme Contreras,
por su guía en todo el proceso de esta tesis.

Índice

Tabla de abreviaturas	4
Resumen	5
1. Introducción	6
2. Metodología	9
3. Revisión bibliográfica	13
3.1. Neurociencia del aprendizaje, métodos de neuroimagen y validez ecológica	13
3.2. Estrategias actuales para mejorar la validez ecológica de métodos de neuroimagen	23
3.2.1. Estrategia de equipos portátiles	23
3.2.2. Estrategia de material audiovisual	30
3.2.3. Estrategia de realidad virtual o aparatos tecnológicos	37
3.2.4. Estrategia de software o algoritmos	41
3.2.5. Estrategia cambio de MNI o combinación de MNI	50
4. Discusión	56
5. Conclusiones	65
Bibliografía	66
Anexos	74

Tabla de abreviaturas

BOLD	Contraste dependiente del nivel de oxígeno en la sangre
CPF	Corteza prefrontal
EEG	Electroencefalografía
fMRI	Resonancia magnética funcional
fNIRS	Espectroscopía funcional de infrarrojo cercano
ISC	Correlación entre sujetos
MEG	Magnetoencefalografía
MNI	Métodos de neuroimagen
OPM	Magnetómetro de bombeo óptico
RV	Realidad virtual
SNR	Relación señal/ruido
TDAH	Trastorno por déficit de atención e hiperactividad
TM	Tecnólogo/a Médico/a
VE	Validez ecológica

Resumen

La neurociencia del aprendizaje se ha convertido en un área de estudio fundamental que explora la forma en que los seres humanos adquirimos conocimientos. La neurociencia utiliza métodos de neuroimagen no invasivos (fMRI, fNIRS, EEG y MEG) para estudiar distintos procesos cognitivos y biológicos que influyen en el aprendizaje. Sin embargo, los métodos de neuroimagen presentan una gran desventaja: poseen baja validez ecológica. Considerando lo anterior, y la importancia que tienen estos estudios en la actualidad, nos planteamos la siguiente pregunta: “¿Cuáles son las estrategias que hoy se utilizan para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen, aplicados a estudios en neurociencia del aprendizaje en seres humanos?”

Así, nuestro objetivo general es exponer, por medio de una revisión sistemática de la literatura disponible, las estrategias más utilizadas para generar modelos ecológicos en métodos de neuroimagen, para el estudio de la neurociencia del aprendizaje en seres humanos. Entonces, se realizó una búsqueda, donde se seleccionaron 52 artículos. Luego de la revisión y expuestos sus principales hallazgos, se realizó una entrevista a un investigador especialista para contextualizar esta revisión, triangular los resultados obtenidos de ella y conversar acerca de las proyecciones que este tema tiene en el medio local.

Se encontraron 5 tipos de estrategias para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen, de las cuales la estrategia de equipos portátiles y la estrategia de material audiovisual son las más utilizadas actualmente. Estas dos estrategias, junto con la realidad virtual, son las más factibles de utilizar en estudios realizados en el contexto nacional, principalmente en EEG. Finalmente, se identificó por medio de la entrevista que el potencial de los profesionales de tecnología médica para desempeñarse en esta área es grande, sin embargo es absolutamente necesaria la formación de postgrado en neurociencia para poder explorar con propiedad estos temas.

1. Introducción

El estudio de la estructura y función del cerebro humano ha sido un tema de gran relevancia en el último tiempo, especialmente en el área de la investigación científica, lo que ha permitido que la neurociencia se establezca como uno de los campos de estudio más fructíferos de las últimas décadas. Los hallazgos proporcionados por las investigaciones en neurociencia han generado un gran impacto en otras áreas de estudio, como la medicina, la psiquiatría y la psicología. De esta forma, se logró establecer la neurociencia cognitiva como un campo que podría sustentar la idea de la emergencia de la mente (1).

La neurociencia cognitiva corresponde a un campo de investigación interdisciplinario, cuyos aportes entregados a la comunidad científica, a través del uso y desarrollo de diferentes tecnologías, permitieron acercarse al conocimiento de los mecanismos implicados en los procesos de aprendizaje y memoria, lo que impulsó el surgimiento del campo de la neurociencia del aprendizaje.

En base a las investigaciones sobre los procesos neuronales asociados al aprendizaje en seres humanos es que surge la neurociencia educacional, la cual es entendida como una área interdisciplinaria que conecta la neurociencia cognitiva, la ciencia educativa y la práctica educacional, con el fin de comprender los mecanismos neuronales involucrados en el aprendizaje, y luego llevar esos resultados a la práctica educacional. Esta área de investigación ha permitido entregar aportes y conocimientos sobre el aprendizaje, especialmente sobre la educación que ocurre en las salas de clases.

Las investigaciones en neurociencia relacionadas al ámbito de la cognición y del aprendizaje utilizan distintas técnicas y herramientas para llevar a cabo sus experimentos y alcanzar sus objetivos de investigación. Dentro de estas técnicas podemos decir que la neuroimagen tiene un papel destacado en el estudio de estos procesos en seres humanos, ya que los métodos

de neuroimagen permiten estudiar la estructura y/o funcionalidad cerebral de manera no invasiva, lo que ha permitido lograr grandes avances en el entendimiento de los procesos cerebrales del aprendizaje y su relación con la neuroanatomía regional. Tales avances no pueden obtenerse mediante los métodos usados en otros modelos animales, como por ejemplo el electrocorticograma (ECoG) o las mediciones de actividad eléctrica de neurona única, intracortical (single-neuron measurement), a pesar de que se han realizado en pacientes, por lo general, epilépticos que necesitan cirugía para el control de convulsiones refractarias. En este último caso, existen investigaciones que efectúan estudios cognitivos aprovechando la realización de estos procedimientos, sin embargo, representan una minoría y requieren de grandes cantidades de dinero para ser llevados a cabo. (2,3).

Dentro de las técnicas de neuroimagen no invasivas más utilizadas en estudios de neurociencia del aprendizaje, podemos mencionar la resonancia magnética funcional (fMRI), la espectroscopia funcional de infrarrojo cercano (fNIRS), la electroencefalografía (EEG) y la magnetoencefalografía (MEG). Estas distintas técnicas de neuroimagen proporcionan información relevante para comprender la funcionalidad cerebral y los procesos involucrados en el aprendizaje en seres humanos; sin embargo, en la actualidad existe una discusión sobre cómo estos resultados pueden ser realmente significativos para la práctica educativa, pues uno de los principales desafíos que presentan los estudios de neuroimagen es su baja validez ecológica (4,5).

La validez ecológica (VE) es un concepto que se originó en el campo de la neuropsicología (6), y que ha tenido distintas acepciones a lo largo de la historia, ajustando y mejorando su significado a través de los años. En la actualidad, la VE se entiende como un concepto que demuestra el nivel en que los resultados de una prueba permiten inferir o explicar la actividad funcional de un sujeto en su vida cotidiana (7), entregando representatividad y generalidad a los resultados de dicha prueba en relación al entorno de la “vida real”.

Una baja VE en los métodos de neuroimagen puede traducirse en resultados simplificados sobre el funcionamiento real del cerebro (8). Entonces, es desde esta problemática que surge la interrogante que buscamos responder en esta revisión bibliográfica: ¿Cuáles son las estrategias que actualmente se utilizan para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen, aplicados a estudios en neurociencia del aprendizaje en seres humanos?

A partir de esta pregunta, se desprenden los siguientes objetivos:

Objetivo general: Exponer, por medio de una revisión sistemática de la literatura disponible, las estrategias más utilizadas para generar modelos ecológicos en métodos de neuroimagen, que contribuyen al estudio de la neurociencia del aprendizaje en seres humanos.

Objetivos específicos

1. Seleccionar, mediante el uso de motores de búsqueda, investigaciones neurocientíficas en seres humanos que contemplen el uso de estrategias que permitan aumentar la validez ecológica de métodos de neuroimagen.
2. Contextualizar las estrategias encontradas en función del área de investigación en las que se utilizan.
3. Establecer, mediante la opinión de un experto en el área, cuáles son las proyecciones concretas de las estrategias expuestas y su alcance.

2. Metodología

Revisión de la literatura

Para responder a nuestra pregunta de investigación, se realizó una revisión de la literatura disponible, utilizando los motores de búsqueda Google Scholar y PUBMED además de revisar la librería electrónica sciELO. Se incluyeron fuentes de información terciarias que se relacionaban con la temática a investigar y que no fueron encontradas de forma directa con los motores de búsqueda anteriormente expuestos.

Los artículos incluídos fueron aquellos publicados entre los años 2017-2022. El idioma de publicación no fue un criterio excluyente. Como filtros de búsqueda se incluyeron artículos de investigaciones realizadas sólo en humanos, y aquellos que estuvieran disponibles como texto completo de forma gratuita (“*open access*”).

Las palabras clave utilizadas en la búsqueda se escribieron en inglés para maximizar los resultados, estas palabras fueron *ecological validity* [1], *educational neuroscience* [2], *cognitive neuroscience* [3], *learning neuroscience* [4], *learning* [5], *wearable neuroimaging* [6] y *naturalistic environment* [7]. Además, se buscaron distintos métodos de neuroimagen como palabras clave individuales: fMRI [8], fNIRS [9], EEG [10] y MEG [11].

Para las combinaciones de las palabras clave se utilizaron los operadores booleanos AND y OR, para así refinar las búsquedas. Estas combinaciones fueron:

1. (“Ecological validity” OR “naturalistic environment”) AND (“fMRI” OR “fNIRS” OR “EEG” OR “MEG”)
2. (“Cognitive neuroscience”) (“Ecological validity” OR “naturalistic environment”) (“fMRI” OR “fNIRS” OR “EEG” OR “MEG”)

3. ("Educational neuroscience") ("Ecological validity" OR "naturalistic environment") ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")
4. ("Learning neuroscience") ("Ecological validity" OR "naturalistic environment") ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")
5. ("Wearable neuroimaging") AND ("learning")

El resumen de los trabajos encontrados con estas combinaciones en cada uno de los buscadores se describe en la siguiente tabla:

	PUBMED	Google Scholar	sciELO
("Ecological validity" OR "naturalistic environment") AND ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")	152	n/a	n/a
("Cognitive neuroscience") ("Ecological validity" OR "naturalistic environment") ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")	34	n/a	10
("Educational neuroscience") ("Ecological validity" OR "naturalistic environment") ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")	10	82	30
("Learning neuroscience") ("Ecological validity" OR "naturalistic environment") ("fMRI" OR "fNIRS" OR "EEG" OR "MEG")	20	43	0
("Wearable neuroimaging") AND ("learning")	12	58	0
Total	228	183	40

Tabla 1. Número de trabajos encontrados en cada motor de búsqueda derivados de las combinaciones de palabras clave. n/a (no aplica) indica que la combinación de palabras clave en dicho buscador entregaba un número demasiado alto de resultados (mayor a mil) aún utilizando filtros acordes a los criterios de inclusión y exclusión, por lo que era imposible analizar dicha cantidad de artículos.

Después de completar la búsqueda en los 3 buscadores, se obtuvo un total de 451 trabajos de diversos tipos (mayormente artículos y revisiones bibliográficas), los cuales fueron pasados por un filtro para la eliminación de duplicados, quedando un total de 377 trabajos. Posteriormente se procedió con la revisión y selección de cada uno. En el caso de los

artículos, se revisó el *abstract* y se seleccionaron finalmente aquellos que efectivamente se relacionaran con investigaciones sobre aprendizaje y cognición en humanos donde se emplearan métodos de neuroimagen, o bien aquellos donde se hablara de técnicas que se pueden emplear para ayudar a mejorar la validez ecológica de estos, dando un total de 35 artículos seleccionados. Para las revisiones bibliográficas encontradas, estas se leyeron completas y se seleccionaron artículos derivados que cumplieran con los mismos criterios de inclusión expuestos anteriormente, quedando un total de 9 artículos derivados de revisiones bibliográficas para el recuento final. El número total de artículos luego de cada proceso de selección fue de 52 (figura 1).

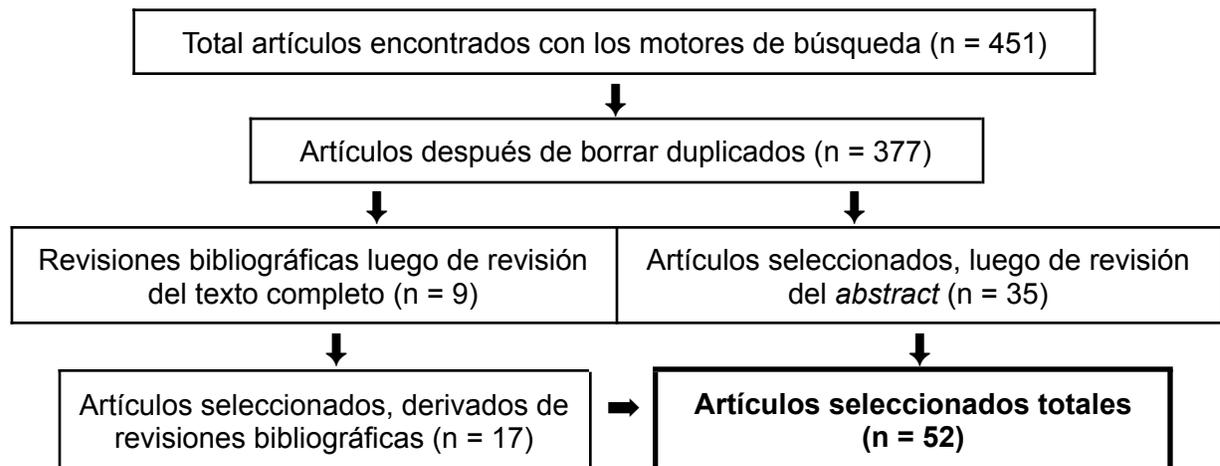


Figura 1. Proceso de selección de artículos para realizar la revisión bibliográfica.

Posterior a la obtención del número final de artículos seleccionados para esta revisión bibliográfica, los trabajos fueron clasificados según la estrategia empleada por la investigación para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen utilizados en los estudios de aprendizaje expuestos (tabla 2).

Estrategia empleada	N° de artículos
Equipos portátiles	18
Material audiovisual	15
Realidad virtual o aparatos tecnológicos	9
<i>Software</i> o algoritmos	4
Cambio de MNI o combinación de MNI	6

Tabla 2. Cantidad de artículos encontrados de cada estrategia empleada para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen.

Entrevista

Como una forma de triangular la información recopilada en la revisión bibliográfica, se realizó una entrevista semiestructurada a un investigador del medio local, miembro activo de un equipo de trabajo que se dedica a la generación de modelos que aumenten la validez ecológica en neurociencia cognitiva. Esta entrevista se orientó en base a cuatro dimensiones:

- 1° Dimensión: puesta en común de una definición de validez ecológica.
- 2° Dimensión: aproximación a la experiencia de trabajo del entrevistado en la generación de modelos ecológicos en neurociencia.
- 3° Dimensión: alcance y proyecciones de las estrategias encontradas en la revisión bibliográfica.
- 4° Dimensión: realidad nacional y rol del TM.

El guión de la entrevista y su transcripción está disponible en el apartado anexo.

3. Revisión bibliográfica

3.1. Neurociencia del aprendizaje, métodos de neuroimagen y validez ecológica

La neurociencia, entendida como el campo de investigación que permite el estudio de la estructura y funcionamiento del cerebro, ha tomado mucha fuerza en el ámbito científico durante los últimos 50 años, pues ha proporcionado una gran cantidad de hallazgos y contribuciones que han tributado a múltiples áreas científicas diferentes, lo que ha permitido la aparición de nuevas áreas de estudio. Tal es el caso de la neurociencia cognitiva, y como una derivada de esta, la neurociencia del aprendizaje.

La neurociencia cognitiva investiga el surgimiento de la función cognitiva a partir de la actividad física y química de las neuronas cerebrales. Las representaciones de actividad en el cerebro consisten en distintos patrones de actividad neuronal, los cuales son propagados a través de conexiones excitatorias e inhibitorias. El aprendizaje, la memoria y otras funciones cognitivas surgen, principalmente, a través de la modificación de estas conexiones. Por esta razón, la neurociencia cognitiva estudia estos procesos para comprender los diferentes mecanismos de la mente (9).

Varios métodos de estudio contribuyen a este campo de investigación, como el estudio de la actividad neuronal durante los procesos cognitivos a través de registros de electrodos únicos y múltiples, el estudio de la actividad cerebral funcional humana utilizando métodos no invasivos, el estudio de los efectos de las lesiones en las funciones cognitivas en humanos y animales, y el uso de modelos computacionales para formalizar hipótesis sobre los mecanismos cognitivos (1,9). Este campo presenta una naturaleza interdisciplinaria para establecer sus metodologías de investigación, de modo que combina paradigmas desarrollados en la psicología, sociología y antropología con datos neurocientíficos, permitiendo, así, enmarcar y respaldar las teorías psicológicas en un contexto biológico y

científico (1,10). Los aportes entregados por la neurociencia cognitiva, en conjunto con la utilización y desarrollo de diferentes tecnologías, como los métodos de neuroimagen, llamaron la atención de investigadores de distintas áreas, como sucedió con el área del aprendizaje (10).

Los científicos vieron en la neurociencia cognitiva una oportunidad para comprender en profundidad la relación entre la funcionalidad cerebral y el aprendizaje, lo que impulsó la búsqueda formal y concreta de nuevas respuestas sobre este tema. Así surgió la neurociencia del aprendizaje, un amplio campo de investigación específico, derivado desde la neurociencia cognitiva, que se enfoca en el estudio y comprensión del proceso de adquisición de nueva información y de la consecuencia de dicho proceso, es decir, de la memoria. El aprendizaje y memoria contemplan tres etapas principales: decodificación, almacenamiento y recuperación de la información adquirida (1). El cerebro tiene la capacidad de cambiar a través de la experiencia, en otras palabras, de aprender, lo que a nivel neuronal se traduce en múltiples conexiones sinápticas, las cuales se refuerzan o debilitan por medio de la ejecución de nuevos estímulos, vivencias y acciones; de esta forma, el aprendizaje que se realiza de modo exitoso afecta directamente a la función cerebral cambiando su conectividad neuronal (1,11,12).

Las investigaciones actuales han demostrado que distintas partes del cerebro están especializadas en distintos tipos de aprendizaje; por ejemplo, los núcleos basales del cerebro poseen un importante rol en el aprendizaje de refuerzo, el cerebelo participa activamente en el aprendizaje por ensayo y error, mientras que la amígdala está involucrada en el aprendizaje basado en el condicionamiento del miedo (1). De esta forma, la neurociencia del aprendizaje investiga todas las etapas involucradas en el proceso de aprendizaje, abarcando la memoria y la estructura del conocimiento, la resolución de problemas, el razonamiento y los procesos regulatorios del aprendizaje (13).

Dentro del campo de la neurociencia del aprendizaje, podría definirse un área más concreta y específica que se centra en estudiar procesos de un mayor nivel de complejidad relacionados con el aprendizaje en seres humanos, como lo es la educación. De esta manera, podemos entender la neurociencia educacional como un campo de investigación interdisciplinario que conecta la neurociencia cognitiva, la ciencia educativa y la práctica educacional con el fin de comprender los mecanismos neuronales involucrados en el aprendizaje, y luego llevar esos resultados a la práctica educacional. Para lograr este último objetivo, la neurociencia educacional debe traducir o trasladar los resultados obtenidos en el ambiente de investigación al ambiente pedagógico, de modo que sean compatibles y aplicables a la enseñanza que imparten los profesionales del área de la educación (14–16) ; y para esto, es necesario que exista una comunicación y retroalimentación continua entre la ciencia y la educación (4,10,16).

A pesar de la gran cantidad de investigaciones realizadas y contribuciones a la educación aportadas por la neurociencia educacional, existen algunos autores que cuestionan el alcance real de este campo de investigación (14). Las principales críticas niegan que la neurociencia sea relevante para la educación (17), así como también critican su funcionamiento práctico y metodológico (18,19). Los autores Varma, McCandliss y Schwartz clasificaron estas críticas e inquietudes según su naturaleza científica o pragmática, y luego reinterpretaron estos comentarios como oportunidades para mejorar y potenciar el campo de la neurociencia educacional (20). Una de las críticas científicas más frecuentes trata sobre los métodos utilizados por la neurociencia, y sobre cómo estos no permiten obtener datos o teorías que sean útiles y aplicables al contexto de la educación en las salas de clases. Este comentario puede ser contrastado con el desarrollo de nuevas tecnologías no invasivas que miden la actividad cerebral, especialmente los métodos de neuroimagen, los cuales han permitido estudiar los efectos de una amplia gama de variables de interés en relación al

aprendizaje y la educación; esto, a su vez, puede ser entendido como una oportunidad para abarcar una mayor cantidad de preguntas de investigación, las que puedan ser mucho más específicas, de modo que puedan ser llevadas a la práctica educativa con una mayor viabilidad. Siguiendo esta misma línea, se presentan diferentes oportunidades a partir de las distintas críticas existentes, las cuales pueden ser llevadas a cabo solo si hay presencia de una buena comunicación entre la comunidad neurocientífica y la comunidad educativa. Afrontar estas críticas permitirá fortalecer las debilidades de la neurociencia educativa, y reafirmar su compromiso con la práctica educativa.

Tal como se mencionó en párrafos anteriores, la neurociencia del aprendizaje utiliza distintos métodos y herramientas para llevar a cabo sus investigaciones y alcanzar sus objetivos, siendo una de las más importantes la neuroimagen. Los métodos de neuroimagen permiten estudiar la estructura y/o funcionalidad cerebral a través de métodos invasivos o no invasivos. Dentro de las técnicas de neuroimagen más utilizadas en la neurociencia del aprendizaje, podemos mencionar:

1. Resonancia magnética funcional (fMRI): Es una herramienta de neuroimagen que emplea resonancia magnética para evaluar cambios dinámicos en tejido cerebral que son causados por cambios en el metabolismo neuronal (21). El término "funcional" indica que este método de neuroimagen se utiliza para evaluar la función cerebral durante un período de tiempo experimental específico.

La resonancia magnética mide las señales de radiofrecuencia emitidas por los átomos de hidrógeno después de la aplicación de ondas electromagnéticas (radiofrecuencia), localizando la señal a través de la utilización de gradientes magnéticos variables. El contraste de cada vóxel (un píxel tridimensional) depende de dos factores: en primer lugar, depende de la densidad protónica dentro del vóxel, debido a las propiedades magnéticas intrínsecas del hidrógeno, y en segundo lugar depende de las propiedades del

microambiente tisular local, las que pueden ser detectadas a través de la manipulación de campos magnéticos. El contraste producido depende de la sincronización precisa de las manipulaciones del campo magnético (secuencias de pulsos) (22). El mecanismo de contraste utilizado para prácticamente todas las resonancias magnéticas funcionales se basa en los cambios dependientes del nivel de oxigenación de la sangre en el tejido cerebral (contraste BOLD). Las regiones del cerebro que están activas durante una tarea en particular requieren más oxígeno que aquellas regiones que no están directamente involucradas en la tarea. Este oxígeno se entrega a través de la hemoglobina por un aumento en el flujo sanguíneo en el área activada. La sangre oxigenada (HbO₂) y la sangre desoxigenada (HbR) tienen diferentes concentraciones de hidrógeno y, por lo tanto, diferentes propiedades magnéticas: la oxihemoglobina es diamagnética, mientras que la desoxihemoglobina es altamente paramagnética (23).

Basándose en la señal BOLD, los investigadores pueden determinar qué partes del cerebro están más activas durante diferentes tareas cognitivas o perceptivas. También pueden comparar la señal BOLD bajo diferentes condiciones experimentales para explorar cómo diferentes tareas o contextos involucran diferentes partes del cerebro.

2. Espectroscopia funcional de infrarrojo cercano (fNIRS): Es una técnica de neuroimagen no invasiva que permite medir los cambios en la concentración de oxihemoglobina y desoxihemoglobina del tejido cerebral, es decir, se basa en la señal BOLD, al igual que fMRI.

En el caso de esta técnica, es posible evaluar la actividad cerebral debido a la transparencia relativa de los tejidos biológicos a la luz infrarroja que se encuentra en el rango de los 650 a 925 nm (24). La luz en este rango es absorbida por la hemoglobina, que en función de su estado de saturación absorberá la luz de manera diferente: la desoxihemoglobina absorbe más fuertemente por debajo de 790 nm y la oxihemoglobina más fuertemente por encima de 790 nm (24,25). Un aumento en la actividad neuronal produce un aumento en la demanda

metabólica del cerebro de oxígeno y glucosa, por lo que aumenta el flujo sanguíneo cerebral regional y este aumento en el flujo trae consigo un aumento en la proporción de HbO₂ en relación con HbR. El cambio en HbO₂ y HbR se mide por la cantidad de luz infrarroja cercana que se refleja o absorbe, que puede ser cuantificada con fNIRS (25,26).

A medida que se ha desarrollado y utilizado instrumentación multicanal y portátil más sofisticada en experimentos cognitivos, fNIRS ha llevado a importantes avances en la comprensión de la actividad cerebral funcional y las funciones cognitivas superiores tanto en adultos como en niños (25).

3. Electroencefalografía (EEG): Corresponde a una técnica no invasiva que permite medir los campos eléctricos cerebrales a través de electrodos que se posicionan sobre el cuero cabelludo. Principalmente, la EEG mide los potenciales postsinápticos generados en las dendritas apicales de las neuronas piramidales de la corteza cerebral. Esto se debe a que los potenciales postsinápticos pueden ser modelados como dipolos de corriente eléctrica, separados por una pequeña distancia entre la fuente y los electrodos, de modo que, siguiendo la Teoría del Campo Lejano, la intensidad del campo disminuye según el cuadrado de la distancia a la fuente (27); por el contrario, otras fuentes eléctricas (como los potenciales de acción) no son modelados como dipolos si no como cuadrípolos, y por tanto la intensidad del campo generado disminuye mucho más rápido a medida que se incrementa la distancia, por esta razón no tienen una gran contribución a la formación de la señal medida por el EEG. Es importante mencionar que las poblaciones neuronales se deben encontrar activas de forma simultánea, para que la corriente generada por los potenciales postsinápticos pueda ser medida en la superficie del cuero cabelludo (28,29).

Los electrodos registran el voltaje de las corrientes neuronales en función del tiempo, a partir de un electrodo "activo" y un electrodo "de referencia". Estos electrodos corresponden a pequeños discos formados por materiales conductores, los cuales son conectados a un

amplificador que permite incrementar el poder de la señal obtenida (29). Los datos del voltaje en función del tiempo pueden ser descompuestos en un conjunto de ondas sinusoidales para obtener los rangos de frecuencia.

La electroencefalografía tiene casi un siglo de antigüedad, lo que le ha permitido ser aplicada en gran espectro de áreas, tanto en el área clínica de diagnóstico y rehabilitación de pacientes como en el campo de la psicología experimental y la neurociencia. La versatilidad y accesibilidad de la técnica combinada con los avances en procesamiento de señales le permiten a esta antigua técnica seguir ofreciendo nuevos aportes a la ciencia (28).

4. Magnetoencefalografía (MEG): Es una técnica de neuroimagen cuyo mecanismo básico se basa en la detección de la corriente eléctrica en un pequeño anillo metálico, la que es inducida por el cambio en el componente del campo magnético perpendicular a la superficie de este anillo. Por lo general existe un conjunto de bobinas dispuestas como un gradiómetro que se acoplan a dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID) y que son extremadamente sensibles a los cambios minúsculos en los campos magnéticos producidos por pequeños cambios en la actividad eléctrica dentro del cerebro. La medición de la corriente inducida determina el valor del cambio en el campo magnético (30).

Hay dos fuentes principales de actividad eléctrica en el cerebro: postsináptica (dendrítica) y axonal. La que es medible en MEG es en gran medida a partir del flujo de corriente postsináptica. Esto debido a las mismas razones que en EEG, ya que el flujo de corriente dendrítica es una buena aproximación a un dipolo y dado que MEG detecta el campo magnético a una distancia relativamente grande, la contribución de la corriente dendrítica será mayor que la contribución axonal. Para tener un campo detectable, algunas decenas de miles de corrientes dendríticas deben fluir en sincronía y debe combinarse de manera constructiva para generar una señal medible (31).

La magnetoencefalografía es una técnica con un amplio rango de aplicaciones en el campo de la neurociencia cognitiva, es especialmente útil para estudiar a larga escala la actividad electrofisiológica de todo el cerebro (32).

Las distintas técnicas de neuroimagen revisadas proporcionan información relevante para comprender la funcionalidad cerebral y pueden aportar hallazgos con el fin de estudiar los procesos de aprendizaje desde la neurociencia; sin embargo, en la actualidad existe una importante discusión sobre cómo estos resultados pueden ser realmente significativos para la práctica educativa, pues uno de los principales desafíos que presentan los estudios de neuroimagen es su baja validez ecológica (4,5).

El concepto de validez ecológica ha presentado diferentes acepciones e interpretaciones a lo largo de la historia, de modo que ha cambiado y ampliado su alcance con el paso del tiempo. Originalmente, se estableció en el campo de la neuropsicología, y fue introducido por el psicólogo Egon Brunswik en el año 1955 para describir la capacidad de generalizar los resultados obtenidos en estudios psicológicos perceptuales bajo condiciones controladas y experimentales, en relación al comportamiento observado en un entorno naturalista (6).

Con la creación de este concepto, Brunswik justificó su oposición al diseño investigativo tradicional (33). Dos décadas más tarde, específicamente en 1979, el psicólogo Urie Bronfenbrenner decidió ampliar la idea, y definió la VE como el grado o medida en que el contexto ambiental o entorno, que es experimentado por los sujetos durante una investigación científica, tiene las propiedades que el investigador asume o supone que dicho entorno posee; de esta forma se amplía el concepto, añadiendo la similitud del entorno en un contexto de vida real representativo para el investigador, con respecto al contexto experimental de la investigación (34).

En el año 1996, el neuropsicólogo Robert Sbordone definió la validez ecológica como la relación funcional y predictiva entre el desempeño de un sujeto en una prueba de neuropsicología y su comportamiento en distintos escenarios de la vida real, como en su hogar, en el trabajo, en la comunidad, etc. (35). Con esta definición, Sbordone menciona que el contexto de la vida real está dado por el contexto del propio sujeto de prueba, y por lo tanto puede variar según cada sujeto o paciente; esto, por tanto, es opuesto a la definición de Bronfenbrenner, la cual limitaba al investigador como el responsable de determinar el contexto de la vida real que debía ser mantenido durante la experimentación.

Por otro lado, en 2001 el psicólogo y profesor Mark Schmuckler, reconoce tres dimensiones de la VE: la naturaleza del escenario o contexto de la investigación, la naturaleza del estímulo y la naturaleza de la respuesta. Estas dimensiones deben captar los “aspectos críticos” del fenómeno estudiado, de esta forma la situación experimental permitirá estudiar de forma real un proceso psicológico dado. Además, Schmuckler destaca la importancia de los parámetros teóricos detrás de una investigación, los cuales deben representar correctamente los procesos psicológicos que determinan (33).

Más tarde, en 2004, las profesoras e investigadoras Lia Kvavilashvili y Judi Ellis destacaron la importancia de dos características de la VE, la “representatividad” y la “generalización”, características que han sido relacionadas estrechamente con este concepto a lo largo de los años de debate entre los distintos autores. Kvavilashvili y Ellis indicaron que la representatividad de una investigación con respecto al contexto de la vida real, así como el grado de generalidad con el cual los resultados pueden explicar ciertos procesos o tareas de la vida diaria, eran dos aspectos fundamentales para definir y entender la VE (36).

En las últimas décadas, el concepto de validez ecológica ha obtenido aún más popularidad debido a la creciente utilización de nuevas técnicas de neuroimagen en el área de investigación, las cuales emplean tareas y paradigmas mayoritariamente computarizados

que restringen el comportamiento de los sujetos o pacientes, y que generan ambientes aislados y controlados, eliminando casi por completo los componentes encontrados en el ambiente cotidiano y natural (5).

Por esta razón, la VE ha cobrado mayor importancia en el área investigativa, llegando a entenderse hoy en día como un concepto transversal que indica que los resultados obtenidos por un sujeto en una prueba determinada, permiten inferir o explicar la capacidad funcional de dicho sujeto en su día a día (7), y que además, otorga representatividad y generalidad a la investigación con respecto al entorno de la vida real.

Considerando el desarrollo y las acepciones relevantes sobre este concepto, podemos mencionar que, en el contexto planteado en esta revisión bibliográfica, la validez ecológica tiene relación con poder traducir los hallazgos proporcionados por las técnicas de neuroimagen a situaciones de aprendizaje de la vida real.

La mayoría de las investigaciones del área de la neurociencia del aprendizaje presentan limitaciones con respecto a los estímulos y las tareas que se deben desarrollar, pues utilizan técnicas de neuroimagen que poseen una baja VE. Esto, sumado a los ambientes poco naturales y estrictamente controlados en los que se sitúan los equipos, genera dificultad al momento de interpretar los resultados obtenidos en el contexto experimental con respecto a la función cerebral de la vida real o cotidiana (4), llevando a conclusiones incorrectas o demasiado simplificadas sobre el funcionamiento real del cerebro (8). Por esta razón, es importante que al realizar estudios de investigación, exista un equilibrio entre el control experimental y la VE.

Considerando todo lo anteriormente expuesto sobre este concepto, creemos que es de gran importancia realizar investigaciones con una mayor validez ecológica para que así los resultados obtenidos puedan ser interpretados según el contexto cotidiano del sujeto. En el

caso de la neurociencia del aprendizaje, es esencial encontrar estrategias que aumenten la VE de los métodos de neuroimagen, que son las principales herramientas de este campo de investigación en seres humanos. Dado lo expuesto anteriormente, merece la pena preguntarse entonces, ¿Cuáles son las estrategias que actualmente se utilizan para mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen, aplicados a estudios en neurociencia del aprendizaje en seres humanos?

3.2. Estrategias actuales para mejorar la validez ecológica de métodos de neuroimagen

3.2.1. Estrategia de equipos portátiles

En esta estrategia se agrupan todos aquellos estudios donde el uso de un equipo portátil aplicado a un método de neuroimagen permite la realización de estudios donde se emplean paradigmas en ambientes naturalistas para responder a una pregunta de investigación. También se incluyen aquellos trabajos donde se busca crear un dispositivo portátil para estos métodos de neuroimagen o bien realizar mejoras a un dispositivo portátil ya existente.

Nos encontramos con 18 trabajos que entran en esta categoría, de los cuales 7 utilizan fNIRS, 10 EEG y un trabajo utiliza MEG. No se encontraron artículos relacionados con fMRI.

MNI	Artículos encontrados
fNIRS	McKendrick, 2017 (37); Balardin, 2017 (38); Hamilton, 2018 (39); Brockington, 2018 (40); Chen C., 2020 (41); von Lümann, 2020 (42); Saikia, 2021 (43).
EEG	Dikker, 2017 (44); Poulsen, 2017 (45); Ko, 2017 (46); Bevilacqua, 2019 (47); Ladouce, 2019 (48); Dikker, 2020 (49); Topalovic, 2020 (50); Grammer, 2021 (51); Hölle, 2021 (52); Chen J., 2022 (53).
MEG	Hill, 2019 (54).

Tabla 3. Clasificación de los artículos encontrados para la categoría de equipos portátiles según el principal método de neuroimagen utilizado.

En el caso de estudios con EEG, la gran mayoría de los artículos se realizan en un contexto de sala de clases utilizando la técnica de *hyperscanning*, que consiste en una grabación de la actividad cerebral de varios participantes de forma simultánea. Esto debido a que el contexto del aula es un entorno ejemplar para investigar sistemáticamente, en condiciones semicontroladas, las interacciones grupales entre estudiantes y con su profesor, al tiempo que se miden resultados conductuales y cognitivos (47).

En los estudios de Dikker et al. (año 2017 y 2020) (44,49) y de Bevilacqua et al. (47) se registró simultáneamente, mediante EEG, la actividad cerebral de estudiantes de secundaria durante sus clases regulares de biología, que consistieron en una combinación de bloques de clase dirigida por el profesor y videos educativos. En el estudio de Dikker et al. 2017 (44) se evaluó la siguiente hipótesis: la sincronización de la actividad cerebral entre los estudiantes predice tanto el *engagement* de los estudiantes con la clase como la dinámica social del grupo (para la configuración experimental, ver Figura 2). Definiendo *engagement* como "la conexión emocional, cognitiva y conductual que existe, en cualquier momento y posiblemente a lo largo del tiempo, entre un usuario y un recurso" (55). El artículo de Bevilacqua et al. (47) es una continuación del estudio anterior, donde a partir de la conclusión de que existe mayor sincronía de la actividad cerebral entre los estudiantes (por lo tanto, mayor *engagement*) durante la presentación de videos educativos en comparación con las clases guiadas por el profesor, se plantea la pregunta si también existe esta diferencia para la retención de contenido. Para ello se incluyeron dos variables, además de la sincronía del estudiante con el grupo: el rendimiento del estudiante (medido con una prueba posterior a la clase) y la sincronía cerebral entre el estudiante y el profesor. Posterior a esto, el trabajo de Dikker et al. 2020 (49) plantea la interrogante de si el horario en el que las clases son impartidas es relevante para la atención de los estudiantes, para ello mide la actividad

cerebral durante tres horarios de clase diferentes: temprano en la mañana, media mañana y tarde en dos escuelas secundarias diferentes de la ciudad de Nueva York.

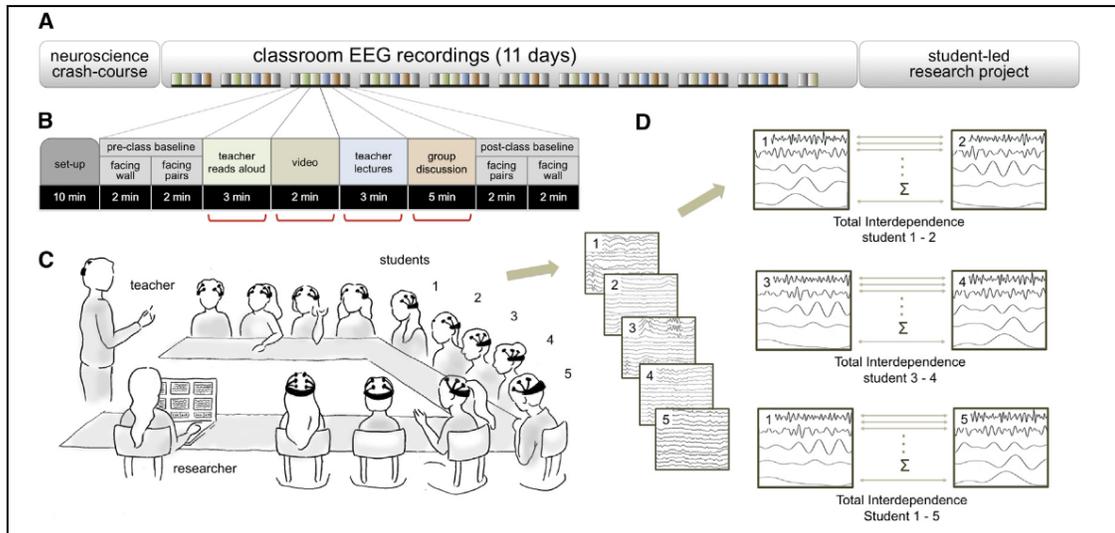


Figura 2. Configuración experimental y procedimiento. A) Línea de tiempo del experimento, el semestre era iniciado con un curso de neurociencia, seguido de 11 días de grabación de datos. B) Ejemplo del procedimiento experimental en un día típico de grabación: La actividad cerebral era medida durante la muestra de video, clase y discusión posterior de forma separada. C) Ilustración de la configuración experimental en la sala de clase con 12 estudiantes utilizando el dispositivo EEG. D) La sincronía inter-cerebral se calculó tomando la señal de EEG bruta de cada estudiante, descomponiéndose en grupos de frecuencia y calculando la suma de la coherencia inter-cerebral entre pares de estudiantes para cada grupo. Figura extraída de Dikker et al. (44).

En un estudio más reciente, realizado por Chen J. et al. (53) se investigaron las diferencias del proceso de aprendizaje en la sala de clase de disciplinas duras y blandas, mediante el registro simultáneo de datos de EEG portátil de treinta y cuatro estudiantes de una secundaria de Beijing durante sus cursos regulares de chino (disciplina blanda) y matemáticas (disciplina dura) a lo largo de todo un semestre. Los resultados obtenidos demostraron el valor de la sincronía inter-cerebral para evaluar el proceso de aprendizaje tanto de disciplinas blandas como duras. Además, estos hallazgos proporcionan información para comprender las diferencias disciplinarias de los procesos neuronales que subyacen al aprendizaje exitoso en el aula y destacan el uso de “*excellent peers*” (estudiantes con un resultado de aprendizaje superior) como un buen candidato para representar un proceso de aprendizaje exitoso para disciplinas blandas.

Un ejemplo de estudio de EEG que no utiliza la técnica de *hyperscanning* es el realizado por Ladouce et al. (48) donde se emplea el EEG móvil para caracterizar la reasignación de la atención que se produce en respuesta a las múltiples demandas de procesamiento sensorial-cognitivo durante el movimiento naturalista. Para ello se realizó primero un experimento con la hipótesis que la atención a un estímulo objetivo se reduce cuando los participantes caminan en comparación a cuando se encuentran quietos. En un segundo experimento se mostró que esta reducción en la atención no es causada por el acto de caminar *per se*. Un tercer experimento identificó las demandas de procesamiento independientes que reducen la atención a los estímulos objetivo durante el movimiento. El estímulo consistía en la presentación de un audio (compuesto de una serie aleatoria de dos tonos: uno agudo y otro grave) reproducido a través de altavoces USB colocados en una mochila liviana y ergonómica que también contenía un amplificador EEG inalámbrico. La tarea de los participantes fue contar silenciosamente los tonos objetivo (tonos graves). Este trabajo expone algunos desafíos y limitaciones para los dispositivos EEG móvil, y señala los últimos avances en matrices de electrodos simplificadas, dando de ejemplo los sensores de EEG alrededor de la oreja (ear-EEG), como el utilizado en otro artículo encontrado en esta revisión realizado por Hölle et al. (52) donde su objetivo era demostrar la viabilidad de las mediciones de EEG a largo plazo de la atención y percepción auditiva en escenarios del día a día (trabajo en oficina) y se utilizó una tarea similar a la de este estudio. Para ello se utilizó un dispositivo móvil denominado cEEGrid (matrices de sensores multicanal con impresión flexible que se posicionan alrededor de la oreja con un adhesivo) conectado a un amplificador, un teléfono inteligente para la presentación de estímulos y la adquisición de datos, y una batería externa. Todos los participantes informaron que la tarea experimental no interfirió notablemente con sus actividades de oficina y que la configuración del sistema del ear-EEG era cómoda de usar durante todo el día.

Con respecto a los artículos que utilizaban fNIRS como método de neuroimagen principal podemos destacar el estudio de Chen et al, 2020 (41), donde se presenta un sistema fNIRS multicanal, con diferentes separaciones fuente-detector, lo que proporciona flexibilidad para elegir la región cerebral a estudiar. El sistema es portátil al incluir un modo de intensidad de luz de doble nivel para optimizar la SNR. El uso de un método de intensidad de luz de doble nivel reduce la dependencia del *hardware* y hace que el sistema sea portátil. Este método amplía la tolerancia de la separación fuente-detector y elimina la necesidad de una calibración canal por canal. El sistema propuesto consiste en un módulo de fuente de luz (de doble longitud de onda: 735 y 850 nm) de 6 canales y un módulo detector de luz de fotodiodo de 8 canales. La salida completa consta de 48 canales de todas las combinaciones fuente-detector. Este sistema se aplicó para recopilar datos de la corteza prefrontal (CPF) durante tres tareas mentales cognitivas (operaciones matemáticas, memoria de números y creación de oraciones con verbos asignados) y en estado de reposo.

También relacionado a fNIRS, encontramos el estudio de Brockington et al. (40) donde el objetivo de su investigación es acercarse un paso más a la formación de metodologías de aula respaldadas por datos obtenidos con fNIRS en varios paradigmas experimentales (interacción profesor-alumno, atención grupal durante una clase y actividad cerebral neurocognitiva simultánea más atención abierta durante una clase). En el primer experimento la tarea de interacción fue un juego de mesa en el que una profesora de 24 años intentó explicar la suma de dos números naturales (menor o igual a seis) a su estudiante de 4 años. Es sabido que la CPF está involucrada en procesos de cognición de alto orden, como contar o calcular, mientras que la unión temporo-parietal está involucrada en funciones sociales como la empatía. A partir de esto se plantea la hipótesis de que la actividad en la unión temporo-parietal de la profesora se combinaría con la de la CPF de la estudiante, por lo tanto, se diseñó un montaje del sistema con 18 canales centrados en estas regiones

cerebrales. Para el segundo experimento, se monitoreó simultáneamente las señales hemodinámicas de cuatro estudiantes de pregrado que asisten a una clase titulada "Introducción a la Epigenética" donde el tiempo experimental se dividió en cuatro bloques que duraron aproximadamente 8 minutos cada uno, con intervalos de 2 minutos. El montaje del sistema sobre la corteza prefrontal bilateral fue el mismo para todos los sujetos. En el tercer experimento, se exploró la viabilidad de monitorear simultáneamente las señales fNIRS más registros de la dinámica de la mirada y la pupila (*eye-tracking*) de un niño de diez años durante una clase titulada "Introducción a la Astronomía". El montaje del sistema NIRS consistió en 16 canales colocados bilateralmente sobre las regiones frontal y parietal.

Por último, podemos mencionar el trabajo llevado a cabo por McKendrick et al. (37), donde el objetivo de su estudio fue evaluar el rendimiento y los estados cognitivos durante el trabajo cognitivo en presencia de trabajo físico y en entornos naturales. El estudio actual monitoreó la hemodinámica de la CPF lateral con un equipo inalámbrico de fNIRS durante la realización de una tarea de memoria de trabajo auditiva mientras el sujeto estaba sentado, caminando en un pasillo vacío o caminando a través de un campus universitario concurrido para explorar las interacciones entre la tarea dual cognitivo-física en entornos naturales en trece participantes. Como podemos ver, es una investigación similar a la realizada por Ladouce et al. (48) en EEG. Los estímulos consistieron en tripletes de tonos compuestos aleatoriamente a partir de frecuencias fundamentales, los cuales se presentaron a través de auriculares bluetooth. Se pidió a los participantes que compararan el triplete que acababan de escuchar con el triplete que habían escuchado anteriormente, esto se denominó un ensayo. Si los tonos que componían los dos tripletes eran de las mismas frecuencias y se presentaban en la misma secuencia temporal, el ensayo se consideraba una coincidencia. Al final de un bloque, el experimentador pidió a los participantes que indicaran verbalmente cuántos ensayos coincidentes escucharon. En este estudio se obtuvieron resultados similares a los

obtenidos en el estudio de Ladouce sobre la influencia del contexto visual relacionado a caminar en espacios abiertos concurridos en la tarea cognitiva, y se le agrega además los resultados obtenidos sobre la redistribución de recursos desde las regiones cerebrales ejecutivas hacia regiones cerebrales encargadas del movimiento para mantener el rendimiento de la tarea física.

En el caso de MEG, encontramos el trabajo realizado por Hill et al. (54) en el cual se diseñó y fabricó un sistema MEG de forma que se pudiera evaluar la actividad cerebral de personas de todas las edades sin la necesidad de restringir su movimiento (ver Figura 3). Para ello se utilizan OPMs (magnetómetros de bombeo óptico), los que permiten medir los campos magnéticos generados por el cerebro con la ventaja de ser pequeños y ligeros. Pueden ser ubicados de manera flexible en la superficie del cuero cabelludo, por lo tanto le dan la capacidad a los sistemas OPM-MEG de ser adaptados a cualquier forma y tamaño de cabeza. En un trabajo previo, los autores realizaron una prueba con un prototipo de un equipo OPM-MEG (56). Sin embargo, este prototipo utilizaba un casco de impresión 3D. Si bien este enfoque maximiza la calidad de la señal al garantizar una colocación óptima del sensor en la superficie del cuero cabelludo, es costoso e inapropiado para su uso con niños, ya que los cascos son pesados, incómodos e intimidantes. En este nuevo trabajo, se rediseñó el sistema original para incorporar un casco simple y ergonómico. Los autores identificaron un equilibrio apropiado entre practicidad y sensibilidad simulando la intensidad de la señal MEG en un niño de 2 años, utilizando una matriz hipotética de 81 OPMs con un casco de bicicleta. Si bien este modelo tiene una caída en la intensidad de la señal en comparación con un casco a medida, es simple, barato, práctico, adecuado para niños y supera ampliamente a los sistemas criogénicos, lo que lo convierte en la opción de casco ideal. Este nuevo modelo fue probado en tres contextos experimentales diferentes: en una tarea sensorial, en un paradigma que simula un juego de computadora de tiro al blanco y

durante el aprendizaje de un nuevo instrumento. Adicionalmente se obtuvo el corregistro de las ubicaciones de los sensores y la anatomía del cerebro, con lo que se generaron imágenes 3D de la firma espacial de los cambios en las oscilaciones neuronales. Este estudio utiliza un número limitado de OPMs, lo que significa que solo una fracción de la cabeza estaba cubierta. Sin embargo, es factible la creación de un sistema completo, pero para ello hay que considerar el peso del sistema. Cada OPM utilizado pesa 20 g, por lo que un sistema de 81 canales (para cubrir el cráneo completo), incluido el casco, pesaría aproximadamente 1800 g, sin contar el peso de los cables. Sin embargo, estos problemas se resuelven con la disponibilidad de una nueva generación de OPMs, que son más pequeños y ligeros (4 g), por lo que también utilizan un cableado más ligero. Esto significa que el peso del sistema completo podría ser tan bajo como 500 g, con un peso de cable insignificante.



Figura 3. Sistema MEG. Configuración experimental para participantes de 2 años (izquierda), 5 (centro) y 24 años (derecha). Los OPM, alojados en un casco de bicicleta modificado, median la señal MEG. Figura extraída de Hill et al. (54).

3.2.2. Estrategia de material audiovisual

La estrategia de material audiovisual hace referencia al uso de todas aquellas herramientas de tipo audiovisual, entendiéndose como parte de ellas la exposición de videos a través de pantallas y la emisión de música u otros sonidos a través de altavoces o auriculares, las cuales permiten el mejoramiento de los resultados obtenidos con los métodos de neuroimagen al establecer características que se acercan a aquellas encontradas en un

ambiente cotidiano o naturalista (como escuchar una conversación, por ejemplo), y por lo tanto, permiten mejorar la validez ecológica de dichos métodos.

Al realizar la búsqueda y selección de bibliografía, se encontraron 15 documentos que usaban la estrategia de material audiovisual. En ellos, 8 utilizaban fMRI, 5 EEG y 2 MEG como método de neuroimagen principal. No se encontraron documentos que utilizaban fNIRS como método principal con esta estrategia.

MNI	Artículos encontrados
fMRI	Kohls, 2018 (57); Moraczewski, 2018 (58); Alarcón, 2020 (59); Kim, 2020 (60); Meer, 2020 (61); Salmi, 2020 (62); Toiviainen, 2020 (63); Ylinen, 2022 (64).
EEG	Cohen, 2018 (65); Backer, 2019 (66); Heim y Keil, 2019 (67); Hausfeld, 2021 (68); Liebherr, 2021 (69).
MEG	Nunes, 2020 (70); de Vries, 2021 (71).

Tabla 4. Clasificación de los artículos encontrados para la categoría de material audiovisual según el principal método de neuroimagen utilizado.

Entre los documentos que utilizaban fMRI como método de neuroimagen, podemos destacar la investigación de Salmi et al. (62), en donde se buscó comprender la respuesta atencional cerebral en personas adultas con TDAH (trastorno por déficit de atención e hiperactividad) en situaciones donde existen múltiples estímulos sensoriales. Para esto, se utilizó un diseño experimental principal que permitía evocar características de los déficits de atención cotidianos (como lo es la distracción). El diseño experimental consistió en la visualización de un clip con sonido de una película que representaba una interacción social compleja mientras se realizaba una adquisición de distintas imágenes con fMRI. Sobre la música de la banda sonora de la película, se agregaron tres tipos de distractores auditivos (un discurso hablado, una pieza de música de jazz y ruido blanco), los cuales se reprodujeron de forma intermitente durante 15 segundos (ver Figura 4), y se les pidió a los participantes que prestaran atención

a la película y que trataran de ignorar los sonidos irrelevantes. El nivel de volumen de los distractores sonoros era tal que permitía seguir el diálogo de la película, pero se requería una atención adicional para lograrlo. La pista de audio se reprodujo a través de audífonos con forma de tapón, y la película se proyectó en una pantalla semitransparente detrás de la cabeza de los participantes, los cuales visualizaron la película a través de una serie de espejos que permitían su proyección. Posteriormente, los datos obtenidos se analizaron con un enfoque basado en la correlación entre sujetos (ISC). De esta forma, se revelaron valores de ISC más débiles en el grupo con TDAH en relación con el grupo control en múltiples áreas del cerebro. Esto significa que, en general, los participantes con TDAH presentaron una menor correlación o sincronía neuronal al momento de seguir la conversación. Además, los valores de ISC en la corteza parietal posterior (en el precúneo y el lóbulo parietal superior) fueron más bajos en los participantes con TDAH cuando se presentó música o un discurso irrelevante de fondo; pero no cuando se presentó ruido blanco adicional o cuando no hubo distractores. Los resultados anteriores demuestran que las regiones sensoriales primarias de las personas con TDAH presentan una actividad cerebral anormal durante la visualización y escucha de una conversación de varios hablantes con distractores sonoros.



Figura 4. Distractores auditivos del diseño experimental. Los participantes observaron un fragmento de la película “*Three Wise Men*” mientras se obtenían los datos de fMRI. Durante la visualización de la película, existieron periodos en donde se agregaron distintos distractores sonoros, como música de jazz (rojo), un discurso hablado (magenta) o ruido blanco (verde), y también existieron periodos en los que no se agregó ningún tipo de distractor (azul). Figura extraída de Salmi et al. (62).

Un modelo experimental similar al anterior se utilizó en la investigación de Ylinen et al. (64), pues se utilizaron diálogos presentados de forma audiovisual como estímulos para evaluar

los mecanismos neuronales del procesamiento del habla y la atención selectiva en presencia de habla irrelevante en personas neurotípicas; y para eso, se adquirieron imágenes de fMRI mientras los participantes observaban y escuchaban un video de un diálogo entre dos personas, que además presentaba fragmentos de un audiolibro de fondo como distractor auditivo. Los participantes debieron realizar distintas tareas mientras escuchaban el diálogo (tarea semántica, tarea fonológica y tarea visual) para así evaluar la atención selectiva en distintos contextos. Los resultados variaron considerablemente según el tipo de tarea realizada, demostrando que los mecanismos neuronales del procesamiento del habla y la atención selectiva al habla están fuertemente modulados por la tarea realizada por el oyente. Por otra parte, los autores concluyeron que si el objetivo de una investigación es comprender el procesamiento del habla tal como ocurre en los contextos cotidianos, se debe fomentar el uso de entornos experimentales tan ecológicamente válidos como sea posible, así como lo demuestran los resultados de esta investigación.

Por otro lado, la investigación de Toiviainen et al. (63) utilizó fMRI para estudiar la conectividad cerebral funcional asociada al proceso de percepción del ritmo o *beat* musical (que incluye tanto la inferencia como el mantenimiento del ritmo). Para lograr esto, los participantes escucharon una pieza de tango argentino (“Adios Nonino” de Astor Piazzolla) de 8 minutos de duración mientras se adquirían las imágenes con fMRI. Los participantes debían escuchar atentamente la música emitida a través de auriculares de inserción, mientras mantenían los ojos abiertos. Los resultados de fMRI indicaron que existe una disociación parcial de las redes funcionales que pertenecen a la vía motora cerebelo-tálamo-estriado-cortical, y que están asociadas a la percepción del ritmo musical, en la que el segmento cerebelo-tálamo-estriado desempeña un papel más importante en el mantenimiento del ritmo, mientras que las regiones motoras corticales son clave en la inferencia del ritmo.

Con respecto a los documentos que utilizaban EEG como método principal de neuroimagen, es posible mencionar la investigación de Backer et al. (66), la cual tenía como objetivo validar un nuevo paradigma para estudiar la actividad neuronal relacionada con la vía auditiva y la vía visual de forma simultánea. El paradigma consistía en la utilización de un estímulo auditivo especial de habla continua (llamado "Cheech") y un estímulo visual intercalado, mientras se obtenían los datos de EEG. "Cheech" correspondía a un audio que presentaba distintas oraciones en el idioma inglés, pronunciadas por adultos nativos de inglés británico, y sobre el cual se aplicaron chirridos auditivos (es decir, sonidos transitorios que aumentan rápidamente su frecuencia). Los chirridos se ajustaron sobre las oraciones de tal manera que eran audibles como un traqueteo en la voz de los oradores y se mezclaban de forma perceptiva con el discurso, pero no distraían la atención de su contenido lingüístico, creándose, así, un único objeto de voz perceptivo. Por otro lado, el estímulo visual consistía en reproducir una caricatura en el centro de una pantalla, mientras se encontraba rodeada por dos anillos concéntricos a cuadros, los cuales parpadeaban de forma desfasada durante 2,5 segundos y luego se detenían durante 1 a 3 segundos. El audio se reprodujo a través de un altavoz que se colocó sobre la pantalla de la computadora que reproducía el estímulo visual, a 1,27 metros frente al asiento del participante. Se instruyó a los participantes para que se concentraran en la caricatura, sin instrucciones explícitas de ignorar la imagen parpadeante o los estímulos Cheech. El registro de EEG duró un tiempo total de 12 min. Los resultados indicaron que la mayoría de los participantes tuvieron respuestas significativas para cada uno de los componentes examinados, siendo las respuestas auditivas en el tronco encefálico, la respuesta de latencia larga y la respuesta auditiva de estado estacionario, las respuestas más sólidas. Si bien todos los participantes mostraron una respuesta significativa para al menos un componente de la respuesta de latencia media y para dos componentes de los potenciales visuales evocados, estos no siempre fueron los mismos componentes entre cada participante, de modo que se generó un patrón heterogéneo en relación a los

componentes más activos. Los resultados obtenidos permitieron validar el paradigma Cheech, ya que efectivamente posibilitaron el estudio de la actividad neuronal en varios niveles a lo largo de las jerarquías auditivas y visuales.

La investigación de Cohen et al. (65) utilizó EEG para evaluar el compromiso atencional de la actividad cerebral durante el proceso de aprendizaje en línea, vinculado con la adquisición de conocimientos en dos grupos de estudiantes. Para lograr esto, se aplicó un paradigma que involucraba la visualización de cinco videos educativos sobre física, biología e informática, con una condición de aprendizaje "intencional" y otra "incidental" para modular el compromiso de los estudiantes con respecto a los videos. Los participantes de la condición de aprendizaje "intencional" fueron informados anticipadamente sobre una evaluación que se realizaría de forma previa (pre-test) y posterior (post-test) a la visualización de cada uno de los videos. El grupo de aprendizaje "incidental" completó únicamente el post-test, pero después de ver los cinco videos de forma continua, y sin conocimiento previo de que se realizaría una evaluación. Después de terminar todos los videos y las evaluaciones correspondientes, y luego de un breve descanso, los participantes vieron los videos nuevamente, pero en esta ocasión se instruyó a los sujetos que participaran en una tarea de distracción que consistía en contar en silencio desde el número 1000 hacia atrás, en decrementos de siete, mientras observaban los videos. De esta forma, se obtuvieron datos en dos condiciones (condición de atención y condición de desatención) en cada grupo de estudiantes. Luego, se cuantificó el "compromiso neuronal" mediante la ISC de los datos de EEG que evocaron las distintas tareas de visualización de los videos educativos. Los resultados demostraron un mayor valor de ISC en la condición de atención con respecto a la condición de desatención, lo que significa que cuando los sujetos observaron los videos prestando atención, procesaron la información de forma similar. Además, aquellos estudiantes que tuvieron un ISC más alto en la condición de atención (es decir, que tuvieron

un mayor compromiso neural), también tuvieron un mejor desempeño en las pruebas realizadas. Por el contrario, el valor de ISC de los participantes en el estado de desatención no se correlacionó significativamente con el rendimiento de las pruebas.

Dentro de las investigaciones que utilizaban MEG, es destacable el proyecto de Nunes et al. (70), el cual buscaba mapear y diferenciar actividades cerebrales dinámicas asociadas al procesamiento de clases específicas de estímulos visuales y auditivos. El material audiovisual utilizado consistía en clips de la película “Charlie y la Fábrica de Chocolate” (de una duración total de 4 minutos con 32 segundos), en donde se seleccionaron segmentos que contenían ciertos estímulos visuales específicos, como escenas de rostros y de manipulación manual. También se utilizaron sonidos de la película específicos, como sonidos verbales, no verbales y ruido de fondo (ver Figura 5). La adquisición de datos con MEG se realizó mientras los participantes estaban en posición supina viendo el clip de la película en una pantalla suspendida desde la estructura superior del equipo, a 40 centímetros por encima de sus ojos. El audio del clip de la película se entregó a través de auriculares compatibles con MEG. El clip se presentó dos veces para cada participante, con un breve descanso entre medio. Se indicó a los participantes que permanecieran lo más quietos posible y que prestaran atención a ambas presentaciones. Para investigar las respuestas relacionadas con eventos frente a estímulos visuales (manipulaciones de rostros y manos) y auditivos (verbales y no verbales), se bloquearon temporalmente los datos hasta el inicio del estímulo estudiado, y posteriormente se promediaron los valores entre los distintos ensayos. Los resultados relativos a las pruebas faciales indicaron una mayor activación en la zona occipital lateral derecha (o área facial occipital), en la parte posterior de la corteza temporal superior, y en la corteza occipital inferior y temporal inferior (coincidiendo con la ubicación del área visual temporal superior y el área facial fusiforme). Los estímulos de manipulación manual provocaron la activación de áreas corticales postcentrales y precentrales, y en la

circunvolución marginal superior. Por otra parte, los estímulos verbales generaron una mayor activación en la circunvolución temporal superior izquierda y derecha. Y para los estímulos no verbales, la activación fue más evidente en el área temporal superior derecha y en las áreas orbitofrontales izquierdas.

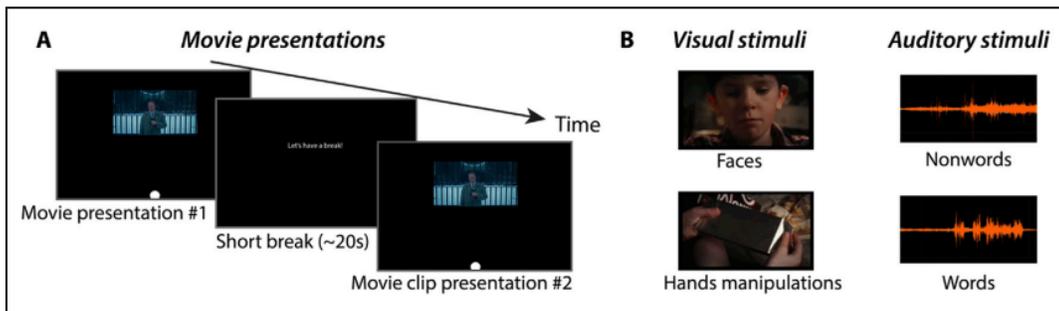


Figura 5. Presentación de la película y ejemplos de estímulos audiovisuales. A) Se observa el esquema de presentación de los fragmentos de la película, la cual fue mostrada dos veces para cada participante, con un breve descanso de 20 segundos entre cada presentación. B) Ejemplos de los distintos tipos de estímulos visuales (“caras” y “manipulación manual”) y estímulos auditivos (“verbales” y “no verbales”) utilizados en los fragmentos presentados. Figura extraída de Nunes et al. (70).

3.2.3. Estrategia de realidad virtual o aparatos tecnológicos

En esta estrategia se agruparon aquellos trabajos en los cuales se utiliza realidad virtual (experiencia generada por computadora que induce una sensación de presencia: sensación de ser transportado y habitar un lugar diferente del entorno inmediato (72)) o algún aparato tecnológico (tableta, simulador, etc) complementario al método de neuroimagen para así mejorar la calidad del estímulo o la interacción del participante, acercándose más a un ambiente naturalista donde las acciones que se quieren evaluar se llevan a cabo.

En la revisión de la literatura encontramos 9 artículos que entran en esta categoría, de los cuales 4 utilizan fMRI, 2 artículos utilizan fNIRS, 1 utiliza EEG y 1 trabajo utiliza MEG. Además, 1 artículo presenta un sistema dónde se utiliza realidad virtual (RV) que puede ser aplicado en cualquiera de los métodos de neuroimagen mencionados.

MNI	Artículos encontrados
fMRI	Durantin, 2017 (73); Brookman-Byrne, 2019 (74); van der Aar, 2019 (75); Vinci-Booher, 2020 (76)
fNIRS	Artemenko, 2018 (77); Baker, 2018 (78)
EEG	Tromp, 2018 (79)
MEG	Roberts, 2019 (80)
Múltiples MNI	Haskins, 2020 (81)

Tabla 5. Clasificación de los artículos encontrados para la categoría de realidad virtual o aparatos tecnológicos según el principal método de neuroimagen utilizado.

Dentro de los artículos que utilizan fMRI, tenemos el estudio de Vinci-Booher et al. (76), en el cual se desarrolla una tableta segura para el uso en RM: “MRItab”. Los estudios de producción de símbolos que utilizan fMRI a menudo utilizan técnicas que introducen un emparejamiento artificial entre la producción motora y la percepción visual. Estas técnicas registran las trayectorias de los lápices utilizando una tableta solo con pantalla táctil y muestran estas producciones en un espejo colocado sobre la cabeza del sujeto. Con la MRItab los participantes pueden ver su propia mano y sus propias producciones en la misma superficie en la que escriben símbolos, sin la necesidad de resolver ningún conflicto entre la retroalimentación visual y propioceptiva sobre dónde está su mano en el espacio, permitiendo estudios de producción de fMRI más ecológicamente válidos. Dado que metanálisis realizados antes del uso de tabletas con pantalla táctil no mencionan activación en la corteza parietal posterior mientras que la mayoría de los informes que usan tabletas con pantalla táctil sí informan de su participación, se plantea la hipótesis de que la activación de la corteza parietal posterior observada en estudios recientes está relacionada con el emparejamiento visual-motor artificial que requieren las tabletas de solo pantalla táctil. Para probar esta hipótesis, se formaron dos grupos de 14 participantes cada uno: un grupo de

pantalla táctil y un grupo MRItab (ver figura 6). En cada grupo la tarea era escribir letras que eran dictadas a través de auriculares mientras estaban en el resonador. Estas letras eran elegidas de un conjunto de 12 letras mayúsculas individuales seleccionadas previamente. Todos los participantes se sometieron a una exploración anatómica de alta resolución seguida de 4 ejecuciones experimentales de fMRI. Durante las ejecuciones de fMRI, los participantes escribieron letras "con y sin tinta" además de percibir pasivamente sus propias letras siendo desplegadas dinámicamente, lo que resulta en 3 condiciones experimentales: escribir con tinta, escribir sin tinta y observar pasivamente. La condición de escritura con tinta proporcionó un emparejamiento directo entre las experiencias visuales y motoras durante la producción con el MRItab, pero no con la tableta de solo pantalla táctil. La condición de escritura sin tinta proporcionó retroalimentación visual de la mano con el MRItab, pero no con la tableta solo con pantalla táctil; ninguna de las dos tabletas proporcionó retroalimentación visual de la letra que se estaba produciendo. La condición de observación pasiva proporcionó la misma retroalimentación visual de la letra que se produjo con ambas tabletas. Los resultados sugieren que la participación de la corteza parietal posterior depende de si los participantes pueden o no ver su mano y producción en la misma superficie donde la estaban produciendo. Estos hallazgos tienen implicaciones para las inferencias de los estudios que utilizan tabletas de escritura solo con pantalla táctil y para la comprensión de la participación parietal en las tareas de producción.

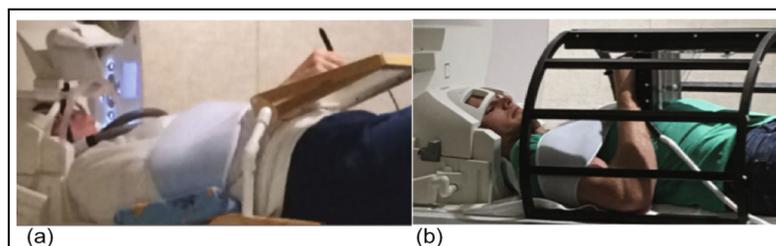


Figura 6. Configuración experimental para los grupos con solo pantalla táctil y con MRItab. a) Los participantes en el grupo de solo pantalla táctil pudieron ver lo que escribían desplegarse en el espejo sobre su cabeza mientras lo producían en la superficie de la pantalla táctil. b) Los participantes en el grupo de MRItab pudieron ver lo que escribían desplegarse en la superficie de MRItab a medida que lo producían en la superficie de la tableta. Figura extraída de Vinci-Booher et al. (76).

En otro artículo de esta categoría, realizado por Tromp et al. (79), se prueba la validez de combinar EEG con realidad virtual para superar el problema de diseñar modelos experimentales con contextos tridimensionales que se asemejen a entornos cotidianos manteniendo al mismo tiempo el control sobre el estímulo, en este caso en un estudio del procesamiento del lenguaje. En particular, se investiga las respuestas electrofisiológicas del cerebro frente a la discordancia entre la información visual y auditiva. El experimento tuvo lugar en un entorno virtual que consistía en un restaurante con ocho mesas seguidas y un invitado virtual sentado en cada mesa (ver Figura 7). Los participantes fueron trasladados pasivamente de mesa en mesa a través del restaurante a través de un procedimiento preprogramado. Todos los invitados del restaurante se parecían a hombres o mujeres caucásicos entre las edades de 25 y 35 años, en línea con la edad, el género y los antecedentes de las personas que grabaron las oraciones. Los invitados mantuvieron una expresión facial neutra durante todo el experimento. Los materiales consistieron en 80 objetos y 96 oraciones. En cada prueba, los participantes vieron un objeto en la mesa en el entorno virtual y luego escucharon una frase de un invitado sentado en la mesa. Las frases (p. ej., "Acabo de pedir este salmón") se emparejaron con objetos (p. ej., un plato con salmón) para que el sustantivo crítico en la oración pudiera coincidir (p. ej., salmón) o no coincidir (p. ej., pasta) con el objeto en la mesa. Antes de ingresar al entorno virtual, se les dijo a los participantes que se moverían a través de un restaurante y que los invitados en el restaurante les dirían algo. Los participantes recibieron instrucciones de prestar mucha atención a los objetos en las mesas y a lo que dijeran los invitados. Para familiarizar a los participantes con los alimentos y bebidas que se sirven en el restaurante virtual, se les pidió que miraran el menú del restaurante antes del inicio del experimento, que contenía todos los objetos y sus etiquetas que podían presentarse en el entorno. Los participantes hicieron 12 rondas a través del restaurante. Durante cada ronda, cada invitado dijo una oración, lo que resultó en ocho oraciones por ronda. Después de cada ronda, los participantes tomaron un

breve descanso. Después del experimento, se pidió a los participantes que completaran dos cuestionarios. El primero evaluó si habían prestado atención durante el experimento. El segundo cuestionario tenía como objetivo evaluar las percepciones de los participantes sobre los agentes virtuales. Como resultado del experimento, se observó un efecto N400, en línea con las predicciones de los autores y los resultados de un estudio anterior (82), donde la incongruencia entre la palabra hablada y el objeto físico en la escena visual se reflejó en un aumento de N400. Esto muestra que la realidad virtual y EEG combinados se pueden utilizar para estudiar la comprensión del lenguaje en entornos tridimensionales realistas. Ya para finalizar, el artículo habla sobre algunas limitaciones que tenía el montaje del sistema de RV, que en algunos casos dificultaba el uso conjunto con EEG debido a que debía ajustarse relativamente bien alrededor de la cabeza. Para superar estas limitaciones, propone el uso de montajes más livianos y flexibles como el Oculus Rift o el uso de equipos de RV donde no se necesita un montaje del sistema en la cabeza del sujeto, sino que los participantes usan gafas 3D para experimentar la inmersión en un entorno virtual como en el sistema CAVE.



Figura 7. Captura de pantalla del entorno virtual. Figura extraída de Tromp et al. (79).

3.2.4. Estrategia de software o algoritmos

Esta estrategia reúne a todos aquellos documentos que incluyen la utilización de un *software* o soporte lógico (entendido como un conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas que permiten la ejecución de ciertas tareas en un sistema informático), o la

utilización de un algoritmo (que corresponde al conjunto de instrucciones o reglas definidas, ordenadas y finitas que permiten solucionar un problema o realizar una tarea o actividad específica) como una herramienta para mejorar la validez ecológica de los MNI permitiendo, de esta manera, obtener resultados más naturalistas.

Al realizar la revisión de la literatura, se encontraron 4 artículos pertenecientes a esta categoría. En ellos, 1 documento utilizaba fNIRS, 1 documento utilizaba EEG y 1 documento utilizaba MEG como método de neuroimagen principal. Además, 1 artículo presentaba un *software* para mejorar la interpretación de datos obtenidos en cualquiera de los métodos mencionados. No se encontraron documentos que utilizaran fMRI como método principal con esta estrategia.

MNI	Artículos encontrados
fNIRS	Pinti, 2017 (83)
EEG	Ascari, 2021 (84)
MEG	Tierney, 2021 (85)
Múltiples MNI	Ayrolles, 2021 (86)

Tabla 6. Clasificación de los artículos encontrados para la categoría de *software* o algoritmos según el principal método de neuroimagen utilizado.

En la investigación de Pinti et al. (83), se presentó la creación de un algoritmo matemático basado en el modelo lineal generalizado (GLM), el cual permite la identificación automática de eventos funcionales (de ahí el nombre del algoritmo, *Automatic IDentification of functional Events* o AIDE) a partir de datos obtenidos con fNIRS. Posteriormente, se aplicó este algoritmo para analizar tres tipos de datos de fNIRS diferentes (datos sintéticos, datos experimentales obtenidos en un laboratorio, y datos experimentales obtenidos de forma naturalista) para comprobar su utilidad y rendimiento en relación a la detección del inicio de los eventos. Esto último es especialmente importante en el caso de los experimentos

naturalistas realizados fuera del laboratorio, explicaron los investigadores en su artículo, pues estos experimentos suelen prescindir de una presentación de estímulos predeterminada y controlada en el tiempo, por lo que es necesario tener claridad del inicio temporal de dichos eventos en los datos obtenidos, para así analizar correctamente los resultados. El algoritmo AIDE detecta estadísticamente los eventos funcionales a partir de datos de neuroimagen de fNIRS, evaluando el mejor ajuste entre diferentes modelos de actividad funcional, considerando todas las combinaciones posibles de tiempo de inicio y duración de los eventos, en donde utiliza un enfoque de análisis de ajuste de mínimos cuadrados basado en GLM para evaluar la similitud de las señales fNIRS con un modelo de respuesta hemodinámica determinado. Más precisamente, el algoritmo AIDE funciona con una señal de “activación de fNIRS” creada a través de la combinación de los datos de oxihemoglobina y los datos de desoxihemoglobina registrados.

En la primera aplicación del algoritmo, se realizaron 1000 simulaciones numéricas con datos sintéticos de fNIRS. El algoritmo AIDE se aplicó a los intervalos de tiempo de los datos sintéticos, simulando un diseño experimental en bloques, un diseño relacionado con eventos y un diseño mixto que combinaba los dos diseños mencionados anteriormente. Los eventos identificados por AIDE se clasificaron como "eventos funcionales correctos" si se encontraban dentro de una ventana de 6 segundos centrada alrededor del inicio del evento, el cual fue determinado y conocido con anticipación. Por otra parte, en la segunda aplicación del algoritmo, se utilizaron datos de fNIRS experimentales reales publicados previamente. Los datos se recopilaron durante una tarea matemática diseñada por bloques. El experimento constaba de seis bloques de tareas en los que se pedía a los participantes que realizaran tres restas consecutivas por cada bloque. Los períodos de tareas estaban separados por períodos de descanso de 30 segundos. Finalmente, se aplicó el algoritmo para analizar datos obtenidos de forma naturalista, fuera del laboratorio. El estudio “de vida

real” o naturalista consistió en realizar un experimento de memoria prospectiva (MP) con un equipo de fNIRS portátil, en donde el participante debía recorrer un lugar típico de Londres y reaccionar de forma específica ante ciertos estímulos sociales y no sociales (entrenando, de esta manera, la MP social y la MP no social), y a la vez debía detectar y contar ciertos objetos determinados del ambiente. Además, toda la sesión experimental fue filmada por tres cámaras de video para un análisis posterior del comportamiento de los participantes. De esta manera, a través del material grabado, se podía conocer el momento exacto en el cual el participante había iniciado las diferentes tareas, así se tenía el conocimiento previo del inicio de las actividades funcionales para correlacionar y contrastar con los datos de fNIRS analizados con AIDE. En los tres casos descritos anteriormente, se logró una alta precisión de detección de eventos funcionales con el algoritmo matemático, de esta forma, el algoritmo AIDE se constituye como una nueva herramienta que proporciona soluciones para el análisis de datos de neuroimagen funcional registrados en escenarios de la vida real.

En el documento de Ascari et al. (84), se presentó la descripción y validación de la plataforma “Biohub”, la cual corresponde a un sistema portátil integrado de *hardware* y *software* que permite adquisiciones sincronizadas de múltiples flujos de datos, que comprenden biopotenciales (como electromiografía, electrocardiografía y electroencefalografía), señales de comportamiento a través de dispositivos de seguimiento ocular, y otras señales que pueden ser recopiladas por un teléfono inteligente, como el sistema de posicionamiento global o GPS, datos provenientes de sensores inerciales y flujos de video. Biohub, además, admite una cantidad variable de fuentes de entrada y dispositivos, y puede ser utilizado como una interfaz programable para la presentación de estímulos.

La plataforma Biohub presenta dos configuraciones. La configuración “portable” está formada principalmente por una placa NVIDIA Jetson TX2 y una placa portadora Orbitty, que en su conjunto forman la placa de desarrollo en donde toda la información es recolectada, grabada

y procesada. La unidad de procesamiento gráfico o GPU de la placa Jetson permite la ejecución de análisis de datos en línea. Además, se utiliza una placa de adquisición de biopotenciales Cyton. En la configuración “móvil”, existe un paquete de baterías que garantiza la potencia de la plataforma y un módem que permite la conectividad a internet, todo es ensamblado en un cinturón que permite transportar el sistema completo (ver Figura 8). Para validar la utilidad de Biohub, se realizaron dos diseños experimentales diferentes con la adquisición de datos de EEG. Para obtener los datos electrofisiológicos se utilizó, además del cinturón de la configuración móvil, una configuración de EEG diseñada específicamente para la obtención de señales en espacios reducidos y naturalistas, la cual consistía en un casco elástico con electrodos de EEG y un armazón de auricular inalámbrico, de modo que en el lado izquierdo del auricular se ubicó la placa Cyton y en el lado derecho se ubicó una batería recargable. Los cables asociados al EEG pasaron por el interior de los auriculares para reducir la carga de cables y mejorar la comodidad de uso (ver Figura 8). El primer diseño experimental consistió en la realización de cuatro tareas para comprobar la confiabilidad del sistema al momento de medir distintas actividades relacionadas con EEG. Para esto, en primer lugar cada participante realizó las diferentes tareas con el sistema Biohub, y luego con un sistema de adquisición de EEG comercial de última generación. Las tareas fueron realizadas dentro de una cabina silenciosa, y se incluían tareas visuales, motoras y de contabilización de estímulos. En el segundo diseño experimental, solo se utilizó la plataforma Biohub para medir los datos de EEG en condiciones naturalistas de conducción de un vehículo. Cada participante realizó primero dos sesiones de práctica en un laboratorio sentado frente a una pantalla, y luego tres sesiones mientras conducían un automóvil real en condiciones controladas en un campo de prueba privado y cerrado. La tarea consistía en un paradigma de rareza (*oddball task*) que estimulaba la generación de potenciales relacionados con eventos (ERP), de modo que en una pequeña pantalla afirmada desde el parabrisas del auto se presentaban 6 íconos diferentes durante cierta cantidad de tiempo,

cada uno a la vez, y los participantes debían poner atención, identificar y seleccionar el ícono objetivo mientras manejaban el automóvil. La selección del ícono objetivo era realizada con un botón desde el volante del auto (ver figura 9).

Finalmente, los resultados de las distintas pruebas indicaron que los datos electrofisiológicos obtenidos con el sistema EEG Biohub son comparables con los obtenidos con el EEG comercial, obteniendo, además, una mayor SNR para tareas motoras y paradigmas de rareza, en comparación con el sistema comercial. Con respecto a los resultados de la prueba de conducción de un vehículo, la sincronización de flujo múltiple de la plataforma Biohub demostró ser esencial para correlacionar con precisión los fragmentos de datos descartados (debido a la presencia de artefactos excesivos) con la posición a lo largo del circuito recorrido. Todos estos datos respaldan la utilización de Biohub en el campo de investigación, ya que es una plataforma flexible capaz de adquirir, sincronizar con precisión y registrar de manera confiable múltiples flujos de diversas señales relacionadas con el cerebro humano y el comportamiento en entornos de la vida cotidiana.

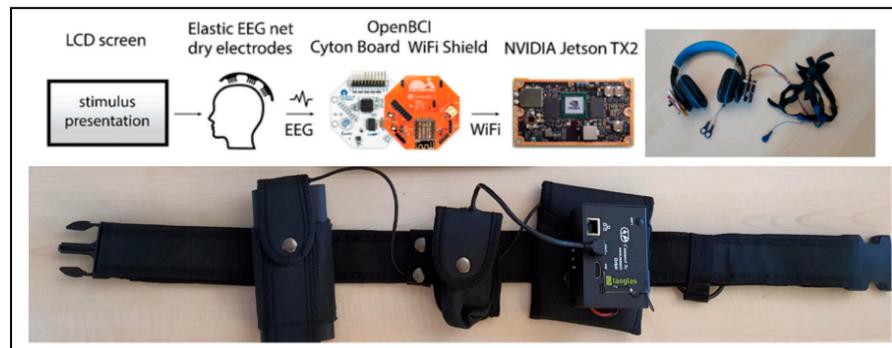


Figura 8. Señales, componentes y configuración móvil de Biohub. En la parte superior izquierda se presenta la secuencia de señales que ocurren dentro de la arquitectura de Biohub. Primero se muestra la presentación del estímulo en una pantalla, luego se obtiene una respuesta cerebral que será captada por los electrodos de EEG, esta información será transmitida a la placa Cyton, y posteriormente, a través de la red WiFi, llegarán los datos hasta la placa NVIDIA. En la parte superior derecha, se presenta el armazón de auricular inalámbrico utilizado como complemento del EEG. En la parte inferior de la figura, se observa el cinturón de la configuración “móvil” de Biohub (de izquierda a derecha: banco de energía, módem USB, placa NVIDIA Jetson TX2 y placa portadora Orbitty en una caja metálica). Figura extraída de Ascari et al. (84).



Figura 9. Participante en prueba de conducción de vehículo real. Se muestra una participante usando los auriculares EEG de Biohub y realizando la sesión de conducción de un automóvil. Afirmada desde el parabrisas, se observa la pantalla que presentaba los distintos estímulos visuales (íconos) de la prueba. Figura extraída de Ascari et al. (84).

Por otra parte, en el trabajo de Tierney et al. (85) se planteó un modelo matemático, cuya base teórica establece que gran parte de la interferencia magnética observada cuando se utilizan equipos OPM-MEG se puede modelar como un campo magnético espacialmente homogéneo. Este modelo es parte de otros enfoques de *software* basados en modelos existentes para permitir la separación de la señal útil del ruido o interferencia. Además, en el documento se presentaron dos experimentos para validar el método propuesto. El modelo matemático estima las componentes del campo homogéneo al considerar que es posible describir el campo magnético medido en un punto como una combinación lineal de los componentes del vector del campo magnético, y dicha combinación está determinada por la unidad normal del eje sensible del sensor del equipo. Como las componentes del vector homogéneo no cambian en el espacio, es posible representar el campo medido a través de matrices. Luego, se obtiene que la matriz que representa los componentes homogéneos del campo magnético puede ser obtenida a través de la multiplicación entre la matriz del campo magnético medido con la inversa de la matriz normal unitaria.

El primer experimento fue realizado para respaldar la teoría en la cual se basa el modelo matemático, y consistió en utilizar un equipo OPM-MEG para grabar el ruido asociado a una

habitación vacía y protegida magnéticamente. De forma posterior, se analizaron los datos obtenidos utilizando el modelo matemático propuesto, y se evaluó si la interferencia o ruido que experimentaron los magnetómetros efectivamente podía ser modelada como un campo homogéneo. Los resultados demostraron una reducción de los valores de los distintos componentes de la interferencia magnética, proporcionando, de esta manera, una verificación empírica de que las aproximaciones de campo homogéneo explican la mayor parte de la variación en la interferencia magnética que se encuentra en una sala protegida magnéticamente. En la segunda prueba experimental se utilizó un paradigma de respuesta evocada de tipo auditivo, con la utilización de unos auriculares, mientras se realizaban mediciones con OPM-MEG. Durante el experimento, se indicó al participante que girara la cabeza de forma continua y lenta en 45° en cualquier dirección, y que ignorara los tonos auditivos que escuchaba a través de los auriculares. Esta prueba buscaba demostrar que el modelo matemático propuesto permitía mejorar el poder estadístico de los análisis a nivel del sensor del equipo, incluso en situaciones con movimiento de cabeza. Los resultados de esta prueba demostraron que la respuesta provocada a nivel del sensor fue confusa y poco precisa en muchos de los sensores del equipo, debido a la variación que se generó en cada medición por los movimientos realizados por el participante. Sin embargo, cuando se aplicó la corrección matemática de campo homogéneo, la respuesta evocada se volvió mucho más clara y la reducción en la variación de cada prueba se reflejó en una mayor magnitud de las pruebas estadísticas corregidas.

Finalmente, en la investigación de Ayrolles et al. (86), se describió un paquete de *software* de código abierto que permite realizar e interpretar el análisis de conectividad inter-cerebral entre dos personas o más. Además, se explicaron las principales funcionalidades de dicho *software*, y se plantearon los pasos a seguir para analizar datos de EEG como ejemplo. El *software* llamado “Hyperscanning Python Pipeline” o HyPyP por sus siglas, es un paquete de

software que permite manejar conjuntos de datos de fNIRS, EEG o MEG recopilados en un contexto de *hyperscanning* o en una configuración no simultánea. El *software* proporciona un conjunto de herramientas de Python para manipular datos de *hyperscanning* y medidas de conectividad inter-cerebrales. Para ejecutar HyPyP se necesita, como mínimo, la versión 3.7 de Python, y se debe contar con las principales bibliotecas de datos de ciencia, como “Scipy”, “scikit-learn”, “Pandas” y “Matplotlib”, y también con bibliotecas impulsadas por la comunidad, como la biblioteca “MNE” y “Autoreject”. El *software* permite cargar, pre-procesar, fusionar, dividir y analizar datos, y realizar y visualizar estadísticas a partir de los datos.

Para explicar las funcionalidades de HyPyP, en el documento se mencionaron las indicaciones que deben ser seguidas para analizar un conjunto de datos de EEG. Primero, se deben cargar los datos sin procesar al *software*, luego se puede realizar un “pre-procesamiento” manual o automático de los datos con las herramientas que se entregan. El “pre-procesamiento” incluye rechazar los segmentos de señal de EEG que no son adecuados y rechazar o interpolar los canales parcialmente defectuosos por cada participante, y luego se debe realizar con el conjunto de datos completo, esto permite conservar los canales y los segmentos de señal que son óptimos para todos los participantes. Posteriormente, se deben fusionar los datos en caso de que estos hayan sido registrados en archivos separados y se desee concatenar los datos de varios participantes en una misma estructura, para así crear un “hiperconjunto” de datos. Después, se continúa con el análisis de datos propiamente tal, en donde es posible calcular la densidad espectral de potencia, establecer los valores de frecuencias y generar matrices de conectividad para cada segmento de señal. A partir de los datos analizados, es posible realizar distintas pruebas estadísticas, como pruebas de permutación (paramétricas y no paramétricas) corregidas según la conectividad de canales a través del espacio y de las frecuencias. Las pruebas estadísticas también permiten comparar valores de conectividad intracerebral entre

los distintos participantes. Finalmente, HyPyP permite visualizar los valores de los análisis estadísticos, ya sea para todos los canales involucrados en la adquisición de datos, o solo para canales específicos.

3.2.5. Estrategia cambio de MNI o combinación de MNI

En esta categoría se incluyen todos los artículos que plantean la utilización de un método de neuroimagen por sobre otro para mejorar la validez ecológica de los resultados obtenidos (“cambio de MNI”). Este cambio de elección, generalmente, se propone luego de reproducir un experimento pero con otro método de neuroimagen, de esta manera se comprueba la utilidad y validez de los resultados obtenidos con el método propuesto. También, se incluyen aquellos artículos que utilizan dos métodos de neuroimagen de forma simultánea para realizar la adquisición de datos (“combinación de MNI”), y así obtener una mayor gama de variables que pueden ser analizadas, aportando una mayor representación a los resultados obtenidos, y por tanto, mejorando su validez ecológica.

Al revisar la literatura, se encontraron 6 artículos pertenecientes a esta categoría. 1 documento proponía la utilización de fNIRS como método de neuroimagen principal en una investigación realizada previamente con fMRI. 1 documento proponía el uso simultáneo de EEG y MEG, además de comparar sus características de forma individual. Y 4 documentos proponían el uso simultáneo de EEG y fNIRS en sus investigaciones.

MNI	Artículos encontrados
fMRI - fNIRS	Vassena, 2019 (87)
EEG y MEG	Boto, 2019 (88)
EEG y fNIRS	Soltanlou, 2017 (89); Soltanlou, 2018 (90); Sun, 2020 (91); Dybvik, 2021 (92)

Tabla 7. Clasificación de los artículos encontrados para la categoría de cambio de MNI o combinación de MNI según el principal método de neuroimagen utilizado.

En la investigación de Vassena et al. (87) se probó la utilidad de fNIRS para el estudio de la contribución de la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC, por sus siglas en inglés) a la fase de anticipación de una tarea cognitiva difícil. Esta temática había sido estudiada previamente con fMRI como método de neuroimagen principal, sin embargo, dadas las potenciales ventajas del uso de fNIRS por sobre la técnica utilizada (portabilidad y menor costo asociado), en esta investigación se buscó probar y validar su utilidad en relación al aporte de la DLPFC a la fase previa o de anticipación de una tarea compleja. Para eso, se realizó un paradigma que implicaba un esfuerzo cognitivo, en donde veinte participantes realizaron cálculos aritméticos mentales fáciles y difíciles mezclados de forma aleatoria, mientras se adquirían datos de fNIRS. Los participantes se sentaron delante de una pantalla que permitía la visualización de las operaciones matemáticas, y cerca de un teclado que les permitiría seleccionar su respuesta. Al comienzo de cada operación, se presentaba una señal visual de 1 segundo de duración, que indicaba si el próximo cálculo sería fácil (un cuadrado azul) o difícil (un cuadrado magenta), y posteriormente se presentaba la tarea. En una prueba fácil, la tarea consistió en una secuencia de dos operaciones aritméticas con tres números pequeños, que se mostraban en pantallas consecutivas (por ejemplo “3 + 1 + 1”). Mientras que en una prueba difícil, la tarea consistió en una secuencia de operaciones aritméticas más complejas, con tres números más grandes, que se mostraban en pantallas consecutivas (por ejemplo “8 + 15 – 6”), con el mismo tiempo disponible para responder. Después del problema aritmético, se presentaban dos posibles resultados en la pantalla, y los participantes tenían que seleccionar el resultado que creían correcto, presionando un botón en el teclado. Durante la prueba, se midió la dinámica de la hemoglobina oxigenada en 26 canales de medición que cubrían la corteza frontal. Además, se probó si la sensibilidad de DLPFC a la demanda de tareas durante la anticipación del esfuerzo cognitivo era bilateral o unilateral (lateralizada a un hemisferio específico). Posteriormente, se realizó un pre-procesamiento de los datos para eliminar la variabilidad debida al ciclo cardíaco. Luego

de eso, se analizaron los datos obtenidos según los tiempos de reacción y la precisión de las respuestas en ambos tipos de problemas. Los resultados demostraron un aumento de la actividad de DLPFC al momento de anticipar una tarea difícil (un problema aritmético más complejo), en comparación con uno más fácil. Esto, además de confirmar la contribución de DLPFC en la anticipación de una tarea cognitiva difícil, tal como lo sugería un estudio previo con fMRI, también estableció el uso de fNIRS como una herramienta no invasiva y rentable para investigar el papel de DLPFC en este proceso.

En el artículo escrito por Boto et al. (88), se combinó la utilización de EEG y OPM-MEG para validar y evaluar los beneficios de su uso conjunto en ciertas pruebas cognitivas y motoras, así como también se compararon mediciones obtenidas de forma individual para evaluar el desempeño de los equipos por separado. En esta investigación se utilizaron dispositivos OPM-MEG de segunda generación, los cuales fueron montados en gorras flexibles junto con los electrodos de EEG para las mediciones simultáneas (ver Figura 10). Para las mediciones de datos individuales, se utilizó el sistema OPM-MEG y el sistema de EEG de forma separada. Se realizó un paradigma motor, en donde solo se obtuvieron mediciones simultáneas; y también se realizó un paradigma de reposo, en donde se obtuvieron tres tipos de mediciones (simultánea, solo OPM-MEG y solo EEG). En el paradigma motor, el participante debió realizar abducciones repetidas de su dedo índice derecho, en seis carreras o bloques separados por breves periodos de descanso. En las dos primeras carreras, se pidió al participante que se mantuviera lo más quieto posible; en las dos carreras siguientes, se pidió al participante que hiciera pequeños movimientos naturales; y en las dos carreras finales se pidió al participante que hiciera grandes movimientos, incluyendo la rotación de su cabeza hasta donde le resultara cómodo, pero sin cambiar la posición del cuerpo. En el paradigma de reposo, se recolectaron diez mediciones de 4 minutos de duración para cada tipo de medición. En la mitad de las grabaciones, se le pidió al participante que permaneciera

quieto, y en la otra mitad de las grabaciones se le pidió que hiciera movimientos corporales naturales. Los resultados mostraron que con la cabeza fija, EEG y OPM-MEG ofrecieron mediciones electrofisiológicas de alta fidelidad a nivel de cada canal, demostrando que los OPM de segunda generación se pueden montar muy cerca de los electrodos EEG, sin pérdida apreciable en la calidad de los datos en ninguno de los dos equipos. Por otra parte, los resultado individuales mostraron ciertas ventajas en el uso de OPM-MEG, esto debido a que la señal de EEG, especialmente la señal de la banda gamma, se degradaba significativamente en presencia de movimiento, de modo que el artefacto muscular (principalmente de cabeza y cuello) degradó parte de la señal obtenida. Por el contrario, la señal OPM-MEG individual resultó con una menor degradación.

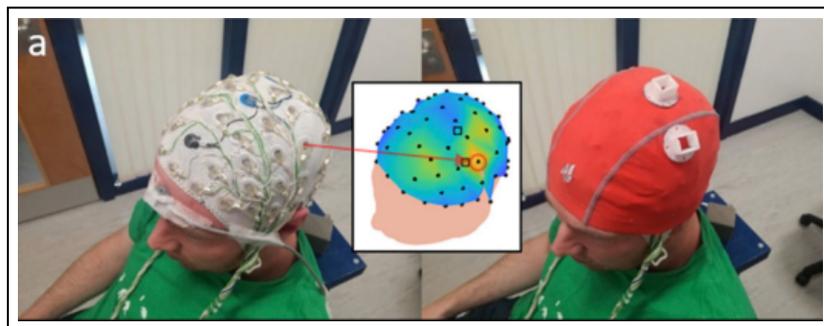


Figura 10. Configuración simultánea de EEG y OPM-MEG. En la fotografía izquierda se observa la gorra de EEG montada en la cabeza del participante. En la fotografía derecha se observa una segunda gorra flexible, superpuesta a la gorra anterior, que contiene los OPM. El gráfico central muestra la ubicación de los electrodos de EEG (puntos negros) y los dispositivos OPM (cuadrados) en la cabeza del sujeto, además muestra el electrodo C3 encerrado en un círculo rojo, ya que fue el electrodo que mostró la respuesta de banda beta más alta. Figura extraída de Boto et al. (88).

Con respecto a los artículos que utilizaron EEG y fNIRS de forma simultánea para la obtención de datos, podemos mencionar las investigaciones de Soltanlou et al. (89,90) en donde se estudiaron temáticas neurocientíficas sobre el aprendizaje de aritmética en niños. En ambas investigaciones, se utilizó un arreglo de sensores de fNIRS sobre una gorra elástica, formando 22 canales de medición sobre cada hemisferio cerebral. En la misma gorra, se integraron 21 electrodos de EEG, formando, de esta manera, un sistema integrado

que combinaba la utilización simultánea de EEG y fNIRS. En la publicación del año 2017 (89), Soltanlou y compañía estudiaron los fundamentos neuronales que estaban asociados con una mayor complejidad aritmética en niños, y para eso se aplicó un paradigma de producción escrita, en donde se presentaron problemas aritméticos de multiplicación de uno y dos dígitos en una pantalla y los niños debían resolver el problema mentalmente, y luego debían escribir su respuesta en una pantalla digital mientras se adquirían los datos. Se utilizó un sistema combinado de EEG y fNIRS, ya que esto permitiría interpretar los cambios dinámicos cerebrales de una forma más consistente, mejorando la interpretación de los datos de las bandas theta y alfa de EEG con los datos obtenidos con fNIRS. El diseño experimental fue en bloques, con una distribución aleatoria de los problemas de multiplicación, y con descansos entre cada bloque. Los resultados indicaron que al resolver problemas de uno y dos dígitos, existía una mayor actividad en el lóbulo parietal superior (SPL) y en el surco intraparietal (IPS), además de incrementos en el poder de la banda theta y disminución de la banda alfa en las regiones occipitoparietales, lo cual conlleva mayores capacidades de dominio específico. La falta de diferenciación en los patrones de activación en SPL y en IPS encontrados tanto en problemas de uno y dos dígitos, sugiere que los niños en esta edad en desarrollo todavía dependen del conocimiento basado en cantidades, además de la recuperación de operaciones aritméticas, para resolver problemas de multiplicación de un dígito. Además, en la resolución de problemas de dos dígitos, se obtuvo una mayor activación en áreas frontales (como en el giro frontal medio), en conjunto con una mayor actividad de la banda theta, lo que indica demandas adicionales del control cognitivo de dominio general y de la memoria de trabajo en problemas aritméticos de mayor complejidad en niños. Esto último se diferencia de los resultados obtenidos con adultos en otras investigaciones (93,94), en donde se observó un mayor procesamiento de dominio específico en problemas aritméticos complejos.

Por otra parte, en la investigación de Soltanlou et al. del año 2018 (90) se investigaron los cambios en la activación cerebral relacionados con el aprendizaje de multiplicaciones simples y complejas en niños con desarrollo neurotípico. Se utilizó simultáneamente EEG y fNIRS para mejorar la interpretación de resultados, aumentar la validez de los hallazgos, y también para permitir la evaluación de múltiples niveles de procesos neurobiológicos subyacentes, midiendo tanto las regiones cerebrales involucradas con fNIRS como la dinámica de las redes neuronales en las distintas bandas con EEG. En esta investigación participaron 26 niños, quienes realizaron entrenamientos de problemas de multiplicación. Para evaluar los cambios inducidos por el entrenamiento, se realizaron mediciones antes y después de las sesiones en un entorno ecológicamente válido que permitía a los niños realizar movimientos naturales mientras solucionaban problemas de multiplicación simples (un dígito) y complejos (dos dígitos). Las sesiones de entrenamiento se realizaron a través de una plataforma de aprendizaje en línea, que permitió ensayar los ejercicios aritméticos. Se realizó una medición con el sistema combinado de EEG y fNIRS previa a la primera sesión de entrenamiento, una medición posterior a la primera sesión, y una medición después de todas las sesiones de entrenamiento (7 sesiones en total), de esta forma se midió el rendimiento y la activación cerebral de los niños durante la resolución de problemas de multiplicación en tres tiempos diferentes. Los resultados obtenidos después de la primera sesión indicaron cambios en la activación cerebral del lóbulo parietal, pero no se observó un mejor desempeño en la resolución de los problemas. Por otro lado, los resultados obtenidos después de finalizar todas las sesiones de entrenamiento demostraron un mejor rendimiento de los participantes, así como también una activación reducida de la red fronto-parietal de la corteza cerebral, una disminución del poder de la banda alfa, y una menor actividad del SPL derecho, lo que respalda los procesos de atención de dominio general relacionados con el procesamiento numérico. De esta forma, se demostró que la mejora del rendimiento a través del aprendizaje aritmético en niños está acompañada de cambios en la activación cerebral.

4. Discusión

Para desarrollar esta revisión bibliográfica se realizó una búsqueda en la literatura disponible mediante 3 motores de búsqueda y se utilizó una combinación de palabras claves relacionadas a los temas centrales: métodos de neuroimagen y validez ecológica. Se obtuvo una buena cantidad de trabajos que pasaron el proceso de selección completo para realizar la revisión propiamente tal (52 artículos). Sin embargo, luego de la clasificación en las 5 estrategias podemos darnos cuenta que más de 30 artículos entran en las primeras dos categorías (18 para el uso de equipos portátiles y 15 para material audiovisual) lo que deja un bajo número de artículos en las otras 3 estrategias (9 para el uso de realidad virtual o aparatos tecnológicos, 4 para la estrategia de *software* o algoritmos y 6 artículos para el cambio o combinación de MNI). Si bien estas herramientas son ampliamente utilizadas en el área de la neurociencia cognitiva como complementos de la investigación, no necesariamente se utilizan como estrategias para mejorar la validez ecológica. Entonces, como primer punto, esta menor cantidad de artículos observados en las estrategias mencionadas, puede deberse a esta razón. Por ejemplo, si realizamos una búsqueda del uso de *software* o algoritmos relacionados a MNI en estudios de neurociencia cognitiva, solamente en un motor de búsqueda (PUBMED) podemos encontrar 44 resultados, lo que demuestra que el bajo número de artículos de esta estrategia no se relaciona a un escaso uso en este tipo de estudios, si no en su bajo uso como estrategia relacionada a VE. En un segundo punto, varios estudios que utilizan estas estrategias quedaron fuera por el filtro de 5 años de antigüedad de la búsqueda. En el caso de uso de realidad virtual en MNI, se obtuvieron 3 artículos para realizar esta revisión, sin embargo, existe un trabajo de revisión bibliográfica (72) de la implementación de esta herramienta efectivamente como estrategia para mejorar la VE donde se habla de varios estudios con RV y diferentes dispositivos que

pueden utilizarse en MNI, los cuales lamentablemente quedaron fuera debido a que todas las investigaciones mencionadas eran anteriores al año 2017.

De las estrategias de acuerdo a las que se organizaron los artículos que se incluyeron en la revisión, la primera corresponde al uso de equipos portátiles. Esta estrategia es la que tuvo el mayor número de artículos (18 trabajos) los que son mayormente aplicables en EEG (10 artículos), seguido por fNIRS (7 artículos). No se encontraron artículos relacionados a fMRI, lo que se explica debido a que esta técnica necesita un resonador magnético, el cual por sus características técnicas no puede ser portátil. El uso de equipos portátiles trae ventajas a estudios neurocognitivos en el área del aprendizaje en comparación a realizar estos mismos estudios en el laboratorio, esto debido a que el contexto influye en los diferentes factores que intervienen en el logro del aprendizaje como lo es, por ejemplo, la interacción social y la atención. Las restricciones metodológicas y el ambiente controlado de un laboratorio limitan las formas en que los investigadores pueden explorar el cerebro en interacciones sociales que se asemejen a las ocurridas en el mundo real, siendo fundamental el estudio de los intercambios cara a cara para comprender de manera más completa el aprendizaje en contextos sociales (47). También hay que considerar que realizar tareas relacionadas con la atención en la vida real implica la necesidad de ignorar una variedad de distracciones e inhibir los cambios de atención a actividades irrelevantes (46), estímulos que son difíciles de imitar de manera verosímil en un laboratorio. De ahí radica la importancia de los equipos de MNI portátiles, ya que nos ayudan a lograr una comprensión más completa del funcionamiento del cerebro humano durante tareas cognitivas debido a que permiten hacer preguntas que no se pueden examinar mediante experimentos de laboratorio (48) o trasladar algunos de estos experimentos a un ambiente más naturalista, siempre teniendo en cuenta que se necesita encontrar un equilibrio entre la naturalidad y el control experimental (52).

La segunda estrategia para mejorar la VE corresponde a la utilización de material audiovisual, y cuenta con 15 artículos en total, de los cuales la mayoría está asociado a investigaciones que utilizan fMRI (8 artículos). Lo anterior se puede explicar ya que, tal como se mencionó en párrafos anteriores, el equipo de fMRI presenta una gran limitación técnica relacionada con el tamaño y características del equipo, el cual debe estar instalado en salas resguardadas magnéticamente y, por lo general, en entornos estériles y artificiales (4), de modo que, la utilización de materiales audiovisuales se presenta como una opción que no requiere de capacitación y que es relativamente simple y de fácil aplicación en fMRI (y en otras técnicas de neuroimagen) para mejorar su validez ecológica (95). Además, en la mayoría de los artículos revisados que utilizaban fMRI (58,61–64), el sonido fue presentado a través de audífonos magneto-compatibles, y el material visual fue presentado en una pantalla, la cual era visualizada por los participantes dentro del resonador a través de un sistema de espejos montados en la bobina de cabeza, de forma que no se necesitaban elementos tan especializados para poder presentar el material, contribuyendo, así, a la fácil aplicabilidad de esta estrategia en la técnica de fMRI. Los beneficios asociados a la utilización de recursos audiovisuales en estudios de neurociencia cognitiva y del aprendizaje se relacionan, por ejemplo, con permitir una investigación más ecológica de procesos atencionales, como el estudio de la atención selectiva ante ciertos estímulos audiovisuales en presencia de habla irrelevante (64), y el estudio de la influencia del contexto situacional y sus demandas motoras y cognitivas sobre el procesamiento de atención (69). También, permiten el estudio de estados cerebrales transitorios a través de la visualización de películas, lo que posibilita un mejor entendimiento de los procesos cognitivos presentes en una experiencia sensorial (61), esto se debe a que las películas y los fragmentos de videos son considerados estímulos naturalistas que permiten imitar experiencias de la vida cotidiana, proporcionando, así, una aproximación a la forma en la que se encuentran los estímulos en la vida real (95). Por otra parte, se ha demostrado la existencia de aumentos en

la correlación entre sujetos (ISC) durante, por ejemplo, la visualización de escenas de películas o al escuchar música (96,97), lo que implica la presencia de respuestas estereotípicas en la corteza cerebral humana frente a ciertos estímulos audiovisuales, lo que podría facilitar el estudio y el análisis de los diferentes procesos cognitivos investigados con estas herramientas.

La siguiente estrategia corresponde al uso de realidad virtual o aparatos tecnológicos, donde se encontraron 9 artículos. Aquellos que utilizaban RV como herramienta para mejorar la validez ecológica probaron que su uso contribuye a analizar de mejor manera aquellos paradigmas donde el contexto y la interacción con este es parte fundamental en la activación cerebral que se pretende estudiar, como por ejemplo la comunicación o la construcción mental de entornos visuales (79,81). Esto debido a la dificultad de diseñar experimentos en el laboratorio con contextos tridimensionales que se asemejen a entornos de la vida real. La RV proporciona una ventaja frente al uso de videos para el estudio de las bases cerebrales de la interacción en la comunicación ya que proporcionan un entorno tridimensional más amplio y complejo que el de una pantalla en dos dimensiones, además de que permite la interacción de los participantes con el entorno y el orador, en lugar de observar pasivamente (79). En el caso de estudios visuales, la RV aporta a los participantes la libertad de elegir su campo de visión, en comparación con la observación de una imagen que se mueve pasivamente frente a ellos en una pantalla (81). Así la realidad virtual permite mayor interacción con el entorno sin sacrificar el control experimental. Da la posibilidad de tener un entorno con un orador controlado para estudiar aspectos de la comunicación de una manera más natural, además de tener el control sobre las características de los estímulos visuales en entornos virtuales en estudios de visión. En el caso de los aparatos tecnológicos, estos ayudan a mejorar la naturalidad del estímulo en estudios de atención y aprendizaje en niños y adolescentes de materias como matemáticas y ciencias básicas (73,74,77,78). Esto

permite a los investigadores y educadores comprender los cambios en la función cerebral y patrones de activación cortical de los estudiantes al aprender utilizando herramientas tecnológicas de enseñanza que son utilizadas por ellos en el mundo real (78).

Quizá la ventaja más importante que ofrecen los avances en aparatos tecnológicos son aquellas herramientas magneto-compatibles para su uso en fMRI, método de neuroimagen que solamente se puede realizar en un entorno de laboratorio, como ya fue especificado anteriormente. El uso de aparatos como tabletas magneto-compatibles para estudios de escritura, permiten la realización de experimentos más naturalistas que dan resultados del funcionamiento cerebral más cercanos a los ocurridos en contextos de producción escrita en la vida real, además que estos dispositivos pueden ser útiles para otros estudios de integración visual-motora, atención espacial, dibujo de figuras complejas, etc (76).

La estrategia de utilización de *software* o algoritmos para mejorar la VE cuenta solo con 4 artículos, de modo que es una de las categorías que posee la menor cantidad de investigaciones revisadas. En esta estrategia no se destacó la utilización de un MNI en especial, ya que tanto EEG, fNIRS y MEG tuvieron asociados el mismo número de artículos. Por otra parte, no se encontraron artículos asociados a la utilización de fMRI en esta categoría. La poca cantidad de artículos pertenecientes a esta estrategia puede ser debido a que la creación y la ejecución de estas herramientas conllevan un alto grado de dificultad, pues en la mayoría de los casos, y sobre todo para la utilización de *softwares*, es necesario aprender el lenguaje de la programación, mientras que la aplicación de algoritmos está frecuentemente asociada con la utilización de *machine learning* o “aprendizaje automatizado”, el cual suele ser desconocido para los neurocientíficos cognitivos (98). Usar herramientas de *software* o de algoritmos matemáticos permite, por ejemplo, mejorar el análisis de los datos obtenidos de forma ecológica, para así conseguir una mejor representatividad de estos con respecto a las situaciones observadas en la vida cotidiana. Lo

anterior se puede lograr a través de una estandarización de los enfoques de análisis en estudios de *hyperscanning*, y de esta forma mejorar la interpretación de los datos obtenidos en ambientes ecológicos (86). O también, al facilitar la identificación de eventos funcionales en aquellos diseños experimentales no estructurados en donde el inicio de los eventos no está predeterminado, como en algunos experimentos naturalistas donde la línea de tiempo de los eventos se desconoce de antemano (83).

La última estrategia corresponde al cambio de MNI o la combinación de MNI, y se encontraron 6 artículos asociados a esta estrategia. La mayor cantidad de investigaciones revisadas en esta clasificación (4 artículos) utilizaban una combinación simultánea de EEG y fNIRS, lo cual puede ser justificado por el hecho de que estas técnicas de neuroimagen miden aspectos complementarios de la actividad cerebral (características electrofisiológicas y hemodinámicas), de modo que se adquiere una mayor información cerebral y esto, a su vez, permite una mayor precisión de la decodificación y análisis de los datos obtenidos (99,100), por lo que se podría preferir esta combinación de técnicas de neuroimagen por sobre otras combinaciones. El beneficio asociado a la utilización simultánea de dos o más MNI se relaciona, principalmente, con la obtención de una mayor cantidad de datos complementarios, los cuales permiten incrementar la validación de los resultados, disminuir el sesgo y los errores (91,92), y así lograr enunciar conclusiones que integran todos los resultados obtenidos (89), de modo que permitan aumentar la VE al mejorar la representatividad de los procesos estudiados. Por otro lado, realizar un cambio de MNI en una investigación permite validar y establecer nuevas técnicas para estudiar un mismo fenómeno, lo cual puede ser favorable en caso de realizar investigaciones más naturalistas, ya que, por ejemplo, podría dar la posibilidad de una mayor movilidad de los participantes, o permitir la adquisición de datos mientras los participantes realizan otras actividades (87), lo que a su vez permitiría abarcar una mayor gama de preguntas de investigación.

Considerando todas las características y fundamentos anteriormente mencionados sobre las distintas estrategias planteadas en esta revisión, creemos que las estrategias más factibles para aplicar en nuestra realidad nacional corresponden a la estrategia de equipos portátiles y la estrategia de material audiovisual. Posteriormente, considerando también las palabras del profesional entrevistado, a estas dos estrategias sumamos también el uso de realidad virtual, aplicadas principalmente a equipos de EEG. Durante los últimos años, la utilización de EEG se ha extendido por distintos e importantes laboratorios nacionales (101–104), de forma que se ha convertido en la herramienta y técnica de neuroimagen principal para el estudio de la neurociencia cognitiva en humanos en nuestro país. Entonces, tomando en cuenta las características de los equipos de EEG, creemos que la estrategia de portabilidad será una herramienta útil y factible de aplicar a estos equipos, y que permitirá mejorar la validez ecológica de las investigaciones realizadas, pues así se logrará registrar la dinámica cerebral mientras los participantes se mueven libremente, incluso mientras participan en comportamientos cotidianos frente a un entorno en constante cambio (48). Por otra parte, la estrategia de material audiovisual se presenta como una herramienta de fácil aplicación y ejecución, que permite acercar el ambiente cotidiano a los participantes a través de la imitación de experiencias de la vida real demostradas en los distintos estímulos visuales y auditivos presentados en las investigaciones (95), permitiendo, así, mejorar la VE de dichas investigaciones.

Luego de hacer la revisión bibliográfica propiamente tal, se realizó una entrevista a un investigador que trabaja con modelos ecológicos en el área de la neurociencia para así conocer su opinión respecto al tema y sus proyecciones. La persona entrevistada correspondió al Prof. Iván Plaza Rosales, quien es doctor en ciencias biomédicas, tecnólogo médico con mención en oftalmología y optometría, e investigador colaborador del laboratorio de neurosistemas de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile. Como primer punto

de la entrevista, se definió el concepto de validez ecológica, la que es entendida por el profesional como la forma de acercar la investigación a contextos de la vida diaria, es decir, pasar de un ambiente donde todas las variables están controladas a uno donde las cosas se dan de manera más natural pero sin perder del todo el control experimental. El profesional comenta que ha participado en distintos equipos donde ha trabajado con este concepto, estableciendo 3 grandes áreas de trabajo: La primera área ha consistido en dar a conocer el concepto de validez ecológica y de presentar ejemplos de estudios ecológicos en congresos. La segunda área de trabajo ha estado enfocada en realizar publicaciones que permitan exponer los conceptos e investigaciones en las que han estado trabajando, y en cómo mejorar dichas publicaciones (por ejemplo, a través de revisiones bibliográficas). La tercera área se ha centrado en implementar cambios directamente en los paradigmas experimentales para así acercarlos a un contexto un poco más naturalista.

En cuanto a la proyección de los sistemas ecológicos y las estrategias que permiten mejorar la validez ecológica, el entrevistado se refiere a que las proyecciones dependen de factores externos a la ciencia, como la tecnología y el acceso a ella. Esto, a nivel regional, limita la implementación de las estrategias, sin embargo, a nivel internacional se ha demostrado su factibilidad y es un área que está en constante desarrollo. Específicamente en Chile, señala que, a pesar de las limitaciones de acceso, la factibilidad de realizar neurociencia con modelos ecológicos es bastante alta, ya que hay interés y capacidades. Cree que el MNI más cercano para este fin sería el EEG, sin embargo, otro desafío sería la validación de estos estudios mediante la realización de una mayor cantidad de investigaciones. Además, menciona que aquí es donde una de las estrategias, la realidad virtual, ha ido ganando espacio en nuestro país para hacer más ecológicos los diseños experimentales. Lo anterior permite demostrar que su uso tiene un futuro en la investigación, y a su vez permite realizar proyectos y obtener financiamiento para realizar más estudios que contribuyan a la

validación de modelos ecológicos. Finalmente, se pregunta sobre el rol que el profesional percibe para los tecnólogos médicos en esta área, y él responde que cree que el potencial del TM es grande, pero que debe tener una preparación que entregue las bases para poder participar dentro de equipos de investigación y no solamente quedar clasificado como el ejecutante del procedimiento.

En el apartado anexo se encuentra el guión y la transcripción completa de esta entrevista.

5. Conclusiones

- La validez ecológica, aplicada a estudios que utilizan métodos de neuroimagen, indica que los resultados obtenidos en una investigación permiten explicar la actividad y el comportamiento de un sujeto en su día a día, a través de la traducción de los hallazgos encontrados.
- Las estrategias más utilizadas para generar modelos ecológicos en base a métodos de neuroimagen en neurociencia del aprendizaje son las estrategias de equipos portátiles y material audiovisual.
- El uso de estrategias que permiten mejorar la validez ecológica generan ventajas en las investigaciones en neurociencia del aprendizaje, debido a que acercan los estudios y la experimentación a un contexto de la vida real, mejorando la representatividad y generalización de los procesos observados en relación al entorno de la vida cotidiana.
- A nivel nacional, las estrategias más factibles para aplicar en estos estudios corresponden a las estrategias de equipos portátiles, material audiovisual y realidad virtual, aplicadas principalmente a equipos de EEG.
- El potencial del tecnólogo médico para participar de estos estudios es muy alto, sin embargo existe la necesidad de una formación de postgrado para adquirir competencias que permitan la integración del profesional a equipos de trabajo en este campo.

Bibliografía

1. Gazzaniga MS, Ivry RB, Mangun GR. Cognitive neuroscience: the biology of the mind. Fifth edition. New York: W.W. Norton & Company; 2019. 1 p.
2. Solomon EA, Kragel JE, Sperling MR, Sharan A, Worrell G, Kucewicz M, et al. Widespread theta synchrony and high-frequency desynchronization underlies enhanced cognition. *Nat Commun*. 22 de noviembre de 2017;8(1):1704.
3. Umbach G, Kantak P, Jacobs J, Kahana M, Pfeiffer BE, Sperling M. Time cells in the human hippocampus and entorhinal cortex support episodic memory. *Proc Natl Acad Sci*. 10 de noviembre de 2020;117(45):28463–74.
4. van Atteveldt N, van Kesteren MTR, Braams B, Krabbendam L. Neuroimaging of learning and development: improving ecological validity. *Frontline Learn Res*. 2018;6(3):186–203.
5. Shamay-Tsoory SG, Mendelsohn A. Real-Life Neuroscience: An Ecological Approach to Brain and Behavior Research. *Perspect Psychol Sci*. septiembre de 2019;14(5):841–59.
6. Tupper DE, Cicerone KD. *The Neuropsychology of Everyday Life: Assessment and Basic Competencies*. Springer Science & Business Media; 2012. 354 p.
7. Tirapu-Ustárroz J, Roig T, García-Molina A. Validez ecológica en la exploración de las funciones ejecutivas. *Anales de Psicología*. 2007;23(2):289-299.
8. Cantlon JF. The balance of rigor and reality in developmental neuroscience. *NeuroImage*. 1 de agosto de 2020;216:116464.
9. McClelland JL. Cognitive Neuroscience. En: Smelser NJ, Baltes PB, editores. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* [Internet]. Oxford: Pergamon; 2001 [citado 6 de julio de 2022]. p. 2133–40. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0080430767034069>
10. Ansari D, Coch D, De Smedt B. Connecting Education and Cognitive Neuroscience: Where will the journey take us? *Educ Philos Theory*. 2011;43(1):37–42.
11. Goswami U. Neuroscience, education and special education. *Br J Spec Educ*. 2004;31(4):175–83.
12. Barrera ML de la, Donolo DS, 0000-0002-2096-0741, 3024994, orcid, rn. Neurociencias y su importancia en contextos de aprendizaje. *Rev Digit Univ 1607 - 6079 Vol10 No4 2009* [Internet]. 10 de abril de 2009 [citado 8 de julio de 2022]; Disponible en: <https://www.ru.tic.unam.mx/xmlui/handle/123456789/1493>
13. Council NR. *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School: Expanded Edition* [Internet]. 1999 [citado 8 de julio de 2022]. Disponible en: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/9853/how-people-learn-brain-mind-experience-and-school-expanded-edition>

14. Thomas MSC, Ansari D, Knowland VCP. Annual Research Review: Educational neuroscience: progress and prospects. *J Child Psychol Psychiatry*. abril de 2019;60(4):477–92.
15. Geake J. *The Brain At School: Educational Neuroscience In The Classroom*. McGraw-Hill Education (UK); 2009. 243 p.
16. Feiler JB, Stabio ME. Three pillars of educational neuroscience from three decades of literature. *Trends Neurosci Educ*. 1 de diciembre de 2018;13:17–25.
17. Bowers JS. The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychol Rev*. octubre de 2016;123(5):600–12.
18. Turner DA. Which part of ‘two way street’ did you not understand? Redressing the balance of neuroscience and education. *Educ Res Rev*. 1 de enero de 2011;6(3):223–31.
19. Bishop DVM. Research Review: Emanuel Miller Memorial Lecture 2012 – Neuroscientific studies of intervention for language impairment in children: interpretive and methodological problems. *J Child Psychol Psychiatry*. marzo de 2013;54(3):247–59.
20. Varma S, McCandliss BD, Schwartz DL. Scientific and Pragmatic Challenges for Bridging Education and Neuroscience. *Educ Res*. 1 de abril de 2008;37(3):140–52.
21. Chen JE, Glover GH. Functional Magnetic Resonance Imaging Methods. *Neuropsychol Rev*. septiembre de 2015;25(3):289–313.
22. Lerch JP, van der Kouwe AJW, Raznahan A, Paus T, Johansen-Berg H, Miller KL, et al. Studying neuroanatomy using MRI. *Nat Neurosci*. marzo de 2017;20(3):314–26.
23. Glover GH. Overview of Functional Magnetic Resonance Imaging. *Neurosurg Clin N Am*. 1 de abril de 2011;22(2):133–9.
24. Chen WL, Wagner J, Heugel N, Sugar J, Lee YW, Conant L, et al. Functional Near-Infrared Spectroscopy and Its Clinical Application in the Field of Neuroscience: Advances and Future Directions. *Front Neurosci* [Internet]. 2020 [citado 7 de julio de 2022];14. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2020.00724>
25. Pinti P, Tachtsidis I, Hamilton A, Hirsch J, Aichelburg C, Gilbert S, et al. The present and future use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience. *Ann N Y Acad Sci*. marzo de 2020;1464(1):5–29.
26. Shealy T, Hu M. Evaluating the Potential for Neuro-imaging Methods to Study Engineering Cognition and Project-level Decision Making. En 2017.
27. Michel CM, Koenig T. EEG microstates as a tool for studying the temporal dynamics of whole-brain neuronal networks: A review. *NeuroImage*. 15 de octubre de 2018;180:577–93.
28. Biasucci A, Franceschiello B, Murray MM. Electroencephalography. *Curr Biol*. 4 de febrero de 2019;29(3):R80–5.
29. Tivadar RI, Murray MM. A Primer on Electroencephalography and Event-Related Potentials for Organizational Neuroscience. *Organ Res Methods*. 1 de enero de

- 2019;22(1):69–94.
30. Ioannides AA. Magnetoencephalography (MEG). *Methods Mol Biol* Clifton NJ. 2009;489:167–88.
 31. Hall EL, Robson SE, Morris PG, Brookes MJ. The relationship between MEG and fMRI. *NeuroImage*. 15 de noviembre de 2014;102:80–91.
 32. Gross J. Magnetoencephalography in *Cognitive Neuroscience: A Primer*. *Neuron*. 23 de octubre de 2019;104(2):189–204.
 33. Schmuckler M. What Is Ecological Validity? A Dimensional Analysis. *Infancy*. 1 de octubre de 2001;2.
 34. Bronfenbrenner, Urie. *The ecology of human development: Experiments by nature and design*. Harvard University Press. 1980;
 35. Sbordone RJ, Long C. *Ecological Validity of Neuropsychological Testing*. CRC Press; 1996. 538 p.
 36. Kvavilashvili L, Ellis J. Ecological validity and the real-life/laboratory controversy in memory research: A critical and historical review. *Hist Philos Psychol*. 1 de enero de 2004;9.
 37. McKendrick R, Mehta R, Ayaz H, Scheldrup M, Parasuraman R. Prefrontal hemodynamics of physical activity and environmental complexity during cognitive work. *Hum Factors*. 2017;59(1):147–62.
 38. Balardin JB, Zimeo Morais GA, Furucho RA, Trambaiolli L, Vanzella P, Biazoli C, et al. Imaging Brain Function with Functional Near-Infrared Spectroscopy in Unconstrained Environments. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2017 [citado 14 de mayo de 2022];11. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2017.00258>
 39. Hamilton A, Pinti P, Paoletti D, Ward J. Seeing into the brain of an actor with mocap and fNIRS. En 2018. p. 216–7.
 40. Brockington G, Balardin JB, Zimeo Morais GA, Malheiros A, Lent R, Moura LM, et al. From the Laboratory to the Classroom: The Potential of Functional Near-Infrared Spectroscopy in Educational Neuroscience. *Front Psychol*. 2018;9:1840.
 41. Chen C, Wen Y, Cui S, Qi X, Liu Z, Zhou L, et al. A multichannel fNIRS system for prefrontal mental task classification with dual-level excitation and deep forest algorithm. *J Sens*. 2020;2020.
 42. von Lüthmann A, Zimmermann BB, Ortega-Martinez A, Perkins N, Yücel MA, Boas DA. Towards Neuroscience in the Everyday World: Progress in wearable fNIRS instrumentation and applications. En: *Optics and the Brain*. Optical Society of America; 2020. p. BM3C-2.
 43. Saikia MJ, Besio WG, Mankodiya K. The Validation of a Portable Functional NIRS System for Assessing Mental Workload. *Sensors*. 31 de mayo de 2021;21(11):3810.
 44. Dikker S, Wan L, Davidesco I, Kaggen L, Oostrik M, McClintock J, et al. Brain-to-Brain

- Synchrony Tracks Real-World Dynamic Group Interactions in the Classroom. *Curr Biol CB*. 8 de mayo de 2017;27(9):1375–80.
45. Poulsen AT, Kamronn S, Dmochowski J, Parra LC, Hansen LK. EEG in the classroom: Synchronised neural recordings during video presentation. *Sci Rep*. 7 de marzo de 2017;7:43916.
 46. Ko LW, Komarov O, Hairston WD, Jung TP, Lin CT. Sustained Attention in Real Classroom Settings: An EEG Study. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2017 [citado 16 de mayo de 2022];11. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2017.00388>
 47. Bevilacqua D, Davidesco I, Wan L, Chaloner K, Rowland J, Ding M, et al. Brain-to-Brain Synchrony and Learning Outcomes Vary by Student–Teacher Dynamics: Evidence from a Real-world Classroom Electroencephalography Study. *J Cogn Neurosci*. 1 de marzo de 2019;31(3):401–11.
 48. Ladouce S, Donaldson DI, Dudchenko PA, Ietswaart M. Mobile EEG identifies the re-allocation of attention during real-world activity. *Sci Rep*. 1 de noviembre de 2019;9(1):15851.
 49. Dikker S, Haegens S, Bevilacqua D, Davidesco I, Wan L, Kaggen L, et al. Morning brain: real-world neural evidence that high school class times matter. *Soc Cogn Affect Neurosci*. 1 de noviembre de 2020;15(11):1193–202.
 50. Topalovic U, Aghajan ZM, Villaroman D, Hiller S, Christov-Moore L, Wishard TJ, et al. Wireless Programmable Recording and Stimulation of Deep Brain Activity in Freely Moving Humans. *Neuron*. 28 de octubre de 2020;108(2):322-334.e9.
 51. Grammer JK, Xu K, Lenartowicz A. Effects of context on the neural correlates of attention in a college classroom. *NPJ Sci Learn*. 6 de julio de 2021;6(1):15.
 52. Hölle D, Meekes J, Bleichner MG. Mobile ear-EEG to study auditory attention in everyday life : Auditory attention in everyday life. *Behav Res Methods*. octubre de 2021;53(5):2025–36.
 53. Chen J, Qian P, Gao X, Li B, Zhang Y, Zhang D. Inter-brain coupling reflects disciplinary differences in real-world classroom learning. *bioRxiv*. 2022;
 54. Hill RM, Boto E, Holmes N, Hartley C, Seedat ZA, Leggett J, et al. A tool for functional brain imaging with lifespan compliance. *Nat Commun*. 2019;10(1):1–11.
 55. Attfield S, Kazai G, Lalmas M, Piwowarski B. Towards a science of user engagement (Position Paper). 1 de enero de 2011;
 56. Boto E, Holmes N, Leggett J, Roberts G, Shah V, Meyer SS, et al. Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system. *Nature*. marzo de 2018;555(7698):657–61.
 57. Kohls G, Antezana L, Mosner MG, Schultz RT, Yerys BE. Altered reward system reactivity for personalized circumscribed interests in autism. *Mol Autism*. 2018;9:9.

58. Moraczewski D, Chen G, Redcay E. Inter-subject synchrony as an index of functional specialization in early childhood. *Sci Rep.* 2 de febrero de 2018;8(1):2252.
59. Alarcón G, Morgan JK, Allen NB, Sheeber L, Silk JS, Forbes EE. Adolescent gender differences in neural reactivity to a friend's positive affect and real-world positive experiences in social contexts. *Dev Cogn Neurosci.* junio de 2020;43:100779.
60. Kim HC, Jin S, Jo S, Lee JH. A naturalistic viewing paradigm using 360° panoramic video clips and real-time field-of-view changes with eye-gaze tracking. *NeuroImage.* 1 de agosto de 2020;216:116617.
61. Meer JN van der, Breakspear M, Chang LJ, Sonkusare S, Cocchi L. Movie viewing elicits rich and reliable brain state dynamics. *Nat Commun.* 5 de octubre de 2020;11(1):5004.
62. Salmi J, Metwaly M, Tohka J, Alho K, Leppämäki S, Tani P, et al. ADHD desynchronizes brain activity during watching a distracted multi-talker conversation. *NeuroImage.* 1 de agosto de 2020;216:116352.
63. Toiviainen P, Burunat I, Brattico E, Vuust P, Alluri V. The chronnectome of musical beat. *NeuroImage.* 1 de agosto de 2020;216:116191.
64. Ylinen A, Wikman P, Leminen M, Alho K. Task-dependent cortical activations during selective attention to audiovisual speech. *Brain Res.* 15 de enero de 2022;1775:147739.
65. Cohen S, Madsen J, Touchan G, Robles D, Lima S, Henin S, et al. Neural engagement with online educational videos predicts learning performance for individual students. 2018.
66. Backer KC, Kessler AS, Lawyer LA, Corina DP, Miller LM. A novel EEG paradigm to simultaneously and rapidly assess the functioning of auditory and visual pathways. *J Neurophysiol.* 1 de octubre de 2019;122(4):1312–29.
67. Heim S, Keil A. Quantifying intermodal distraction by emotion during math performance: an electrophysiological approach. *Front Psychol.* 2019;10:439.
68. Hausfeld L, Shiell M, Formisano E, Riecke L. Cortical processing of distracting speech in noisy auditory scenes depends on perceptual demand. *NeuroImage.* marzo de 2021;228:117670.
69. Liebherr M, Corcoran AW, Alday PM, Coussens S, Bellan V, Howlett CA, et al. EEG and behavioral correlates of attentional processing while walking and navigating naturalistic environments. *Sci Rep.* 16 de noviembre de 2021;11(1):22325.
70. Nunes AS, Kozhemiako N, Moiseev A, Seymour RA, Cheung TPL, Ribary U, et al. Neuromagnetic activation and oscillatory dynamics of stimulus-locked processing during naturalistic viewing. *NeuroImage.* 1 de agosto de 2020;216:116414.
71. de Vries IEJ, Marinato G, Baldauf D. Decoding Object-Based Auditory Attention from Source-Reconstructed MEG Alpha Oscillations. *J Neurosci Off J Soc Neurosci.* 13 de octubre de 2021;41(41):8603–17.

72. Reggente N, Essoe JKY, Aghajan ZM, Tavakoli AV, McGuire JF, Suthana NA, et al. Enhancing the Ecological Validity of fMRI Memory Research Using Virtual Reality. *Front Neurosci* [Internet]. 2018 [citado 7 de julio de 2022];12. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00408>
73. Durantin G, Dehais F, Gonthier N, Terzibas C, Callan DE. Neural signature of inattentive deafness. *Hum Brain Mapp*. noviembre de 2017;38(11):5440–55.
74. Brookman-Byrne A, Mareschal D, Tolmie AK, Dumontheil I. The Unique Contributions of Verbal Analogical Reasoning and Nonverbal Matrix Reasoning to Science and Maths Problem-Solving in Adolescence. *Mind Brain Educ Off J Int Mind Brain Educ Soc*. agosto de 2019;13(3):211–23.
75. van der Aar LPE, Crone EA, Peters S. What Characterizes Adolescents Struggling With Educational Decision-Making? *Mind Brain Educ*. 2019;13(3):184–97.
76. Vinci-Booher S, James KH. Ecological validity of experimental set-up affects parietal involvement during letter production. *Neurosci Lett*. 13 de julio de 2020;731:134920.
77. Artemenko C, Soltanlou M, Ehlis AC, Nuerk HC, Dresler T. The neural correlates of mental arithmetic in adolescents: a longitudinal fNIRS study. *Behav Brain Funct BBF*. 10 de marzo de 2018;14(1):5.
78. Baker J, Moyer-Packenham P, Tucker S, Shumway J, Jordan K, Gillam R. The brain's response to digital math apps: a pilot study examining children's cortical responses during touch-screen interactions. *J Comput Math Sci Teach*. 2018;37(1):69–86.
79. Tromp J, Peeters D, Meyer AS, Hagoort P. The combined use of virtual reality and EEG to study language processing in naturalistic environments. *Behav Res Methods*. abril de 2018;50(2):862–9.
80. Roberts G, Holmes N, Alexander N, Boto E, Leggett J, Hill RM, et al. Towards OPM-MEG in a virtual reality environment. *NeuroImage*. 1 de octubre de 2019;199:408–17.
81. Haskins AJ, Mentch J, Botch TL, Robertson CE. Active vision in immersive, 360° real-world environments. *Sci Rep*. 31 de agosto de 2020;10(1):14304.
82. Peeters D, Özyürek A. Electrophysiological evidence for the role of shared space in online comprehension of spatial demonstratives. *Cognition*. 7 de diciembre de 2014;136:64–84.
83. Pinti P, Merla A, Aichelburg C, Lind F, Power S, Swingler E, et al. A novel GLM-based method for the Automatic IDentification of functional Events (AIDE) in fNIRS data recorded in naturalistic environments. *NeuroImage*. 15 de julio de 2017;155:291–304.
84. Ascari L, Marchenkova A, Bellotti A, Lai S, Moro L, Koshmak K, et al. Validation of a Novel Wearable Multistream Data Acquisition and Analysis System for Ergonomic Studies. *Sensors*. 7 de diciembre de 2021;21(24):8167.
85. Tierney TM, Alexander N, Mellor S, Holmes N, Seymour R, O'Neill GC, et al. Modelling

- optically pumped magnetometer interference in MEG as a spatially homogeneous magnetic field. *NeuroImage*. 2021;244:118484.
86. Ayrolles A, Brun F, Chen P, Djalovski A, Beauxis Y, Delorme R, et al. HyPyP: a Hyperscanning Python Pipeline for inter-brain connectivity analysis. *Soc Cogn Affect Neurosci*. 18 de enero de 2021;16(1–2):72–83.
 87. Vassena E, Gerrits R, Demanet J, Verguts T, Siugzdaite R. Anticipation of a mentally effortful task recruits Dorsolateral Prefrontal Cortex: An fNIRS validation study. *Neuropsychologia*. 4 de febrero de 2019;123:106–15.
 88. Boto E, Seedat ZA, Holmes N, Leggett J, Hill RM, Roberts G, et al. Wearable neuroimaging: Combining and contrasting magnetoencephalography and electroencephalography. *NeuroImage*. 2019;201:116099.
 89. Soltanlou M, Artemenko C, Dresler T, Haeussinger FB, Fallgatter AJ, Ehlis AC, et al. Increased arithmetic complexity is associated with domain-general but not domain-specific magnitude processing in children: A simultaneous fNIRS-EEG study. *Cogn Affect Behav Neurosci*. 1 de agosto de 2017;17(4):724–36.
 90. Soltanlou M, Artemenko C, Ehlis AC, Huber S, Fallgatter A, Dresler T, et al. Reduction but no shift in brain activation after arithmetic learning in children: A simultaneous fNIRS-EEG study. *Sci Rep*. 26 de enero de 2018;8.
 91. Sun Y, Ayaz H, Akansu AN. Multimodal affective state assessment using fNIRS+ EEG and spontaneous facial expression. *Brain Sci*. 2020;10(2):85.
 92. Dybvik H, Erichsen CK, Steinert M. Description of a Wearable Electroencephalography+ Functional Near-Infrared Spectroscopy (EEG+ FNIRS) for In-Situ Experiments on Design Cognition. *Proc Des Soc*. 2021;1:943–52.
 93. Delazer M, Domahs F, Bartha L, Brenneis C, Lochy A, Trieb T, et al. Learning complex arithmetic--an fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res*. diciembre de 2003;18(1):76–88.
 94. Menon V, Rivera SM, White CD, Glover GH, Reiss AL. Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing. *NeuroImage*. octubre de 2000;12(4):357–65.
 95. Sonkusare S, Breakspear M, Guo C. Naturalistic Stimuli in Neuroscience: Critically Acclaimed. *Trends Cogn Sci*. 1 de junio de 2019;23.
 96. Hasson U, Nir Y, Levy I, Fuhrmann G, Malach R. Intersubject synchronization of cortical activity during natural vision. *Science*. 12 de marzo de 2004;303(5664):1634–40.
 97. Abrams DA, Ryali S, Chen T, Chordia P, Khouzam A, Levitin DJ, et al. Inter-subject synchronization of brain responses during natural music listening. *Eur J Neurosci*. mayo de 2013;37(9):1458–69.
 98. Kumar M, Ellis CT, Lu Q, Zhang H, Capotă M, Willke TL, et al. BrainIAK tutorials: User-friendly learning materials for advanced fMRI analysis. *PLoS Comput Biol*. enero de

2020;16(1):e1007549.

99. Liu Y, Ayaz H, Shewokis PA. Multisubject “Learning” for Mental Workload Classification Using Concurrent EEG, fNIRS, and Physiological Measures. *Front Hum Neurosci* [Internet]. 2017 [citado 15 de julio de 2022];11. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00389>
100. Fazli S, Mehnert J, Steinbrink J, Curio G, Villringer A, Müller KR, et al. Enhanced performance by a hybrid NIRS-EEG brain computer interface. *NeuroImage*. 2 de enero de 2012;59(1):519–29.
101. Escuela de Psicología Pontificia Universidad Católica de Chile. Laboratorio Neurociencias Cognitivas [Internet]. Escuela de Psicología UC. 2018 [citado 16 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.psicologia.uc.cl/investigacion/laboratorios/laboratorio-neurociencias-cognitivas/>
102. Escuela de Psicología Pontificia Universidad Católica de Chile. Laboratorio de Psicofisiología [Internet]. Escuela de Psicología UC. 2018 [citado 16 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.psicologia.uc.cl/investigacion/laboratorios/laboratorio-de-psicofisiologia/>
103. Lance, Centro de Investigaciones Médicas UC. Laboratorio de Neurociencia Cognitiva y Evolutiva [Internet]. Laboratorio de Neurociencia Cognitiva y Evolutiva. 2020 [citado 16 de julio de 2022]. Disponible en: <http://www.neuro.cl/>
104. Laboratorio de Neurosistemas de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile. Laboratorio de Neurosistemas [Internet]. Laboratorio de Neurosistemas. 2020 [citado 16 de julio de 2022]. Disponible en: <https://neurosistemas.cl/>

Anexos

Se adjunta a continuación la transcripción de la entrevista realizada el día jueves 7 de julio del 2022 al profesional Iván Plaza Rosales.

Buenas tardes profesor Iván Plaza, nosotras somos Moira Belmar y Guillian Leiton, y somos estudiantes de 5to año de la carrera de tecnología médica, mención imagenología, y actualmente estamos realizando nuestro trabajo de investigación, el cual corresponde a una revisión bibliográfica sobre las estrategias que permiten mejorar la validez ecológica de los métodos de neuroimagen aplicados a neurociencia del aprendizaje, entre los cuales tenemos, fMRI, fNIRS, EEG, MEG. Al revisar la literatura, hemos encontrado distintas estrategias que podrían ayudar a mejorar la validez ecológica de estos métodos (por ej, mejorar la portabilidad de algunos equipos, utilizar material audiovisual, realidad virtual o aparatos tecnológicos, entre otras). Un punto importante de nuestra revisión bibliográfica es conocer cuál es el alcance real y las proyecciones de la temática investigada, y por esta razón lo hemos contactado para realizar esta entrevista semi-estructurada y así conocer la opinión de un profesional que trabaje en el área. Nosotras nos informamos de que usted ha trabajado con el concepto de validez ecológica y con modelos ecológicos, realizando investigaciones asociadas al Departamento de Neurociencia de nuestra universidad.

La entrevista que realizaremos a continuación está organizada en cuatro dimensiones, las cuales tratarán distintas temáticas. La entrevista consta de nueve preguntas en total y la idea es que usted pueda responder con total libertad cada una de ellas.

1. ¿Qué entiende usted por validez ecológica en neurociencia cognitiva?

Yo creo que una forma de interpretar el concepto de validez ecológica es cómo, desde el punto de vista de aplicación de estrategias de investigación, podemos acercar la investigación a contextos más naturales o más cercanos a la vida diaria.

¿Qué quiere decir esto? El evitar, desde cierto punto, el control de todas las variables y permitir un poco un desarrollo normal de los acontecimientos que nos permiten llegar a variables cognitivas, variables desde un punto de vista más bien funcionales que sean lo más cercanas a cómo se desenvolvería cada persona en el día a día. Entonces la validez ecológica para mí es eso, es una aproximación de la investigación a un contexto cotidiano.

2. *¿Cómo se acercó o interesó usted al tema de validez ecológica en neurociencias?*

Es un contexto bien amplio. La verdad, desde formación de pregrado, al ser de oftalmología (tecnólogo médico de la mención de oftalmología) siempre me interesó cómo se comportaba el cerebro en distintas situaciones. Luego con el magister en neurociencias me di cuenta que los ojos muestran mucho de ese contexto y de ese comportamiento, la conducta ocular y la conducta pupilar es un reflejo bastante cercano a ciertas funciones cognitivas. Durante el doctorado, el tener la oportunidad de aprender a cómo interpretar esas conductas, creo que, me abrió una puerta mucho más grande a entender desde lo fisiológico a lo fisiopatológico. Y ¿qué me pasó? Cuando llegué a ese punto, surgió sin lugar a dudas la pregunta: ¿qué pasa si es que no estoy dentro del laboratorio? o sea, ¿qué va a pasar si hago lo mismo (o registro las mismas cosas) en un contexto más bien natural? Entonces, con un grupo de personas que trabajan acá en el laboratorio de neurosistemas del departamento de neurociencia, más otros colaboradores que, 2 de ellos están en Estados Unidos en este momento, que trabajaron acá y ahora están en la Universidad de John Hopkins, y con otro académico que está en la Universidad Austral nos planteamos un poco esa idea, si podíamos, como equipo, quizá tratar de intencionar, más que un cambio de paradigma, una aproximación hacia lo ecológico.

Eso fue una discusión que tuvimos hace 2 años, porque hacer un cambio de paradigma implica, desde un principio, reconocer que lo que actualmente se hace está mal. Y nosotros no creemos que esté mal, nosotros creemos que en base a lo que ya existe podemos acercarnos un poco más al estudio ecológico. Entonces planteamos la creación de un grupo, Ecological Cognitive Neuroscience, que busca justamente esto: un estudio un poco más ecológico y cómo tratar de, desde lo que ya hacemos, llevarlo a un contexto un poquito más natural. Incluyendo, por ejemplo, registros de movimientos oculares que sean móviles, incluyendo quizá la opción del EEG que sea portátil, considerando que por un tema técnico antes era más difícil, pero considerando que en la actualidad es posible incluir la realidad virtual dentro de los estudios. Entonces, ir tratando de descontextualizar lo que ya se hacía y sacar todas las trabas más bien metodológicas hace un contexto un poco más abierto a que sea más natural. Y eso incluso con tareas que se sigan presentando frente a una pantalla pero que impliquen otras acciones. No solamente mirar una pantalla gris y ver dónde está la cruz de fijación o mirar un punto específico, sino, por ejemplo, realizar una tarea de navegación virtual en la pantalla. Acercar un poquito más desde ese punto quizá lo que ya se realiza o se realizaba un tiempo atrás.

Ese acercamiento fue nada más que por una inquietud como grupo, donde la verdad es que me sumé porque me interesa, y principalmente mi interés en investigación es realizarlo con pacientes. O sea, todo lo que he visto hasta el momento es neurociencia cognitiva con pacientes, entonces no me sirve algo que esté tan encerrado en un contexto controlado de laboratorio sino algo que sea un poquito más cercano a lo que día a día viven los pacientes también.

3. ¿Desde qué perspectiva la han estado trabajando en los distintos equipos de los que forma parte?

Yo creo que la gran perspectiva es tratar de dar a conocer el concepto de validez ecológica. Yo creo que ese es un trabajo que, si bien la mayoría de los científicos o la gente que trabaja en neurociencia sabe que estamos trabajando en contextos absolutamente controlados, está la limitación de que si yo saco los controles no tengo cómo medir las variables. Entonces, al menos dar a conocer el contexto de validez ecológica permite, dentro todavía a lo mejor de un sistema controlado ir quitando algunas variables e ir reemplazándolas por otras.

Entonces el primer gran trabajo que hemos hecho como grupo es presentar en congresos. Dar a conocer que esto existe y esa oportunidad se dio el año pasado en el congreso de la Sociedad de Neurociencias de Chile. Tuvimos la oportunidad de presentar un simposio sobre estudios ecológicos y neurociencia cognitiva ecológica, donde tuvimos la oportunidad de invitar a dos investigadores realmente importantes, uno de ellos europeo y la otra investigadora estadounidense, que vienen a plantear un poquito... porque debemos reconocer en ese sentido, en ciencias por lo menos, hay muchas cosas que estamos un par de añitos atrás. Entonces ellos vienen a mostrar su evidencia y cómo, cada uno dentro de sus contextos y de sus áreas han podido ir reemplazando ciertas tareas por otras un poco más ecológicas. Ese es el primer punto.

Lo segundo yo diría que, más allá de darlo a conocer en temas de difusión, el tratar de hacer publicaciones. Publicaciones que permitan (como revisiones bibliográficas, partir quizá por ellas) decir cuales son los conceptos claves que se están trabajando y cómo poder ir mejorando. Y por eso es que me interesó participar también de su trabajo porque creo que es super positivo en ese sentido.

Y lo tercero es ir viendo paradigmas experimentales. Ir directamente a cambiar ciertas cosas que nos permitan obviamente ser un poco más flexibles las condiciones y que sean un poco más naturales para los pacientes cuando se hace la tarea.

Como comentábamos al inicio de esta entrevista, nuestro trabajo consiste en una revisión bibliográfica. Una vez hecha la búsqueda en la literatura, los artículos que encontramos fueron agrupados en 5 estrategias para distintos métodos de neuroimagen, las cuales fueron: equipos portátiles, material audiovisual, realidad virtual o aparatos tecnológicos, software o algoritmo, cambio de MNI o combinación de MNI. Dado esto:

4. En base a su experiencia, ¿está de acuerdo con las estrategias encontradas en la revisión? ¿Agregaría alguna otra?

Creo que el abordaje que le han dado a la revisión es bastante amplio y en principio resume, yo creo, todos los aspectos que son más cercanos a ser modificables en el corto plazo. Creo que pueden surgir estrategias a futuro o algunas otras alternativas como para tratar de acercar este contexto ecológico a la investigación, pero de la forma en que está planteado creo que se aborda de manera muy consistente cada uno de los aspectos que podrían ser, al corto plazo, tratados y modificados para lograr resultados que sean más cercanos a la realidad de cómo funciona el cerebro.

5. ¿Cuál es el alcance general que, a su juicio, tienen las estrategias encontradas? ¿En qué grado cree que cumplen el objetivo de generar modelos ecológicos?

Creo que todas directa o indirectamente buscan evidenciar eso, el funcionamiento del cerebro en el contexto más natural posible. ¿Cómo cada una va a influir? Yo creo que eso también es dependiente de la tarea. Cada una va a tener participación o va a tener una modulación distinta dependiendo de la tarea a la cual se somete cada uno de los participantes. Pero yo creo que en su totalidad, y me parece que debiese ser el

fin de cualquiera de estas estrategias es facilitar el estudio de los mecanismos cerebrales de forma más natural.

6. *¿Cuál cree que es la proyección real a futuro que, a su juicio, tienen estas estrategias para lograr el fin de crear modelos ecológicos en estudios de aprendizaje?*

Yo creo que depende bastante del estado de avance de la investigación, a nivel tanto regional como internacional. A nivel regional, creo que estamos todavía un poco lejos, por no decir bastante lejos, dado que mucho de lo que se utiliza y que se ha modificado en este contexto ecológico ni siquiera lo disponemos a diario en un contexto controlado de laboratorio. Entonces, eso a nivel regional limita bastante. A nivel internacional yo creo que ya las experiencias que se han logrado y los resultados que se tienen de diversos estudios muestran que es muy factible, que es una rama de la neurociencia cognitiva (rama por llamarlo de algún modo) que está en constante evolución. A medida que avanza la tecnología, se van incorporando, se van modificando estrategias y nos permiten obtener mejores resultados enfocados a lo que busca finalmente esta modulación de la forma en la cual estudiamos el cerebro. Entonces, creo que las proyecciones son dependientes de muchos otros factores que son anexos a la ciencia de por sí. Yo creo que depende mucho de tecnología y de acceso a esa tecnología.

7. *¿Cuáles cree usted que son las limitaciones más importantes para generar modelos ecológicos usando estas estrategias?*

Yo creo que, en ese sentido, bueno, hay una limitación, obviamente económica y de recursos, si no tengo el equipo no puedo trabajar en la técnica, no puedo trabajar en variaciones que me permitan hacerlas más ecológicas. Y desde el punto de vista ya más bien metodológico-analítico, tengo que ser lo suficientemente consciente de que no tengo un modelo con el cual contrastarlo, al no tener un control, voy a tener

variables que a lo mejor al “analizarlas por sí solas” no me estarán entregando la respuesta que yo estoy buscando, que al menos controlando el sistema yo puedo tener una respuesta comparada contra otra cosa. Entonces ahí vamos a tener que hacer grandes esfuerzos por tratar de lograr sistemas que me permitan tener esta suerte de convalidación de lo que estoy mostrando, el establecer que ciertos parámetros, en contexto ecológicos, sí me muestran lo que estoy estudiando. Y considero que al menos resolviendo esas dos cosas, van a aparecer otras, pero esas dos cosas yo creo que son elementales para poder obtener investigaciones ecológicas de forma más frecuente.

8. *¿Cuál cree usted que es la factibilidad real de generar estos modelos ecológicos en investigaciones de neurociencia en Chile?*

Creo que la posibilidad o factibilidad que tiene hacer neurociencia ecológica en Chile es bastante alta, yo creo que las capacidades, al menos del punto de vista de recursos humanos y de investigadores, y el interés que se tiene por tratar de hacer un poco más evidente este tipo de estudios, es súper alto. Hay interés, hay capacidad, pero faltan los recursos. Espero que eso cambie un poco, si bien no vamos a tener el último resonador, sí tener, al menos, alternativas de trabajar con otras técnicas. Creo que es más cercana, dentro de las propuestas que ustedes revisaron, la utilización del EEG. Yo creo que el EEG es lo más cercano actualmente, y de un acceso un poco más amplio en Chile, para poder intentar hacer investigaciones ecológicas. Y “el problema”, en ese sentido, sería que para poder validar esa investigación, necesitamos replicarla, entonces, no nos sirve con que un solo centro o un solo laboratorio lo haga, sino que ojalá expandirse a otros centros, a otras regiones, y yo creo que ahí podríamos tener como un segundo problema: primero no tener el equipo de última generación, y segundo que esto [las investigaciones ecológicas] sea muy

centralizado, lo que no me permita validarlo. Pero yo creo que es altamente factible que, en el corto plazo, tengamos la posibilidad de llegar a más lugares. La realidad virtual, por ejemplo, ya se ha ido apoderando de varios lugares en Chile, donde trabajan con realidad virtual, donde pueden hacer mucho más ecológico el diseño experimental, pueden explorar otras alternativas, y eso permite obviamente entregar nueva evidencia que permite soportar estudios futuros con proyectos y financiamiento que uno diga “ok, no estamos apostando por algo que recién se está viendo, sino que vamos a apostar por algo que tiene bastante futuro en términos de proyección científica”.

9. ¿Cuál cree usted que es el rol que el/la TM puede tener en esta área? ¿Desde dónde cree usted que podemos aproximarnos al tema?

Yo creo que el rol trasciende de solamente la ejecución del examen, es un rol que obviamente va a depender de cada uno de los profesionales, en la medida en que esta sea un área de interés para ellos. En términos de la aplicación del examen, yo creo que no hay persona más capacitada que el tecnólogo médico, desde ese punto, pero sin una preparación adecuada, puede que sólo quede clasificado como un “ejecutante del procedimiento” y no como alguien que toma decisiones dentro del mismo diseño experimental, la planificación de la tarea, la metodología de estudio. Entonces, yo creo que el potencial rol que tienen el tecnólogo médico o tecnóloga médica en esta área es altísimo, pero tiene que venir acompañado de alguna preparación que le entregue las bases y los fundamentos necesarios para poder opinar y aportar dentro de los equipos de investigación.

Muchas gracias por su tiempo y su colaboración en el desarrollo de nuestro proyecto.

No, de nada...

[Aquí se entabló una conversación sobre la realidad de nuestro país en comparación con la realidad de otros otros países que invierten una mayor cantidad de recursos en investigación de neurociencias]

Yo creo que es súper fuerte, porque realmente es otra realidad (...) Las capacidades, yo creo que aquí en Chile, son altísimas, hay ciencia de buen nivel, pero hasta cierto punto se truncan las posibilidades de trabajo, y uno se tiene que limitar a lo que ya tiene y ya conoce, entonces ahí hay un déficit súper importante que se tiene que tratar de alguna forma. Esto hace que, por otro lado, migren muchas personas, personas que acá podrían hacer excelentes investigaciones, terminan yéndose al extranjero porque no tienen cómo hacerlo aquí. Entonces sí, es un debe importante que existe a nivel país, porque finalmente todo avance, tanto en medicina como en biomedicina, se sustenta con lo que se está investigando. Si nos quedamos con los libros, maravilloso, pero los libros te muestran lo que ya pasó, no te muestran lo que puede ser, entonces ahí la ciencia toma un rol importante (...) Nosotros como tecnólogos tenemos un rol súper importante, nosotros tenemos las bases de medicinas, las bases clínicas, tenemos las bases diagnósticas, que no todos las tienen, y tenemos la posibilidad de aplicar esa investigación, entonces tenemos que ver en qué banda nos quedamos, hasta dónde queremos aportar, yo creo que es exigente, no es fácil (...), hay que estar constantemente actualizándose, entonces creo que hay un aporte grande que podemos hacer, hay que ver como decía, hasta dónde queremos aportar en esa línea.