

EVIDENCIA Y NEUROCIENCIAS COGNITIVAS: EL CASO DE LA RESONANCIA MAGNÉTICA FUNCIONAL

A. Nicolás Venturelli
Instituto de Humanidades (CONICET/UNC)
nicolasventurelli@gmail.com
Itatí Branca
CIFFyH (UNC)/CONICET
itatibranca@gmail.com

Abstract

Functional magnetic resonance imaging is one of the most commonly used neuroimaging techniques in cognitive neuroscience. Its influence had a central role in establishing the experimental side of the field. Given this, we consider that its status as a source of evidence has not been sufficiently dealt within the philosophical literature. We focus on this issue from the standpoint of the classical problem of defining the scope of localizationist approaches in neuroscience. We attend to the way this tension unfolds today, considering some recent examples of neuroscientific approaches that tackle the dynamic character of the brain's large scale activity. We take into account a number of limitations that functional magnetic resonance imaging presents, distinguishing those of them whose treatment involves not merely technical issues. On the basis of an analysis of some ways researchers deal with them, we claim that there is a considerable extent in which this kind of neuroimaging studies can be oriented according to general assumptions and theoretical considerations. We conclude that this particular theoretical permeability is a main factor affecting the technique's status as neuroscientific evidence.

Recibido: 21 - 05 - 2015. Aceptado: 05 - 08 - 2015.

Keywords: Functional magnetic resonance imaging, neuro-imaging, scientific evidence, cognitive neuroscience, dynamical approach.

Resumen

La resonancia magnética funcional es una de las técnicas de neuroimagen más difundidas en las neurociencias cognitivas. Su influencia tuvo un rol central en la configuración del aspecto experimental de este campo. Frente a esto, consideramos que su estatus como evidencia no ha sido suficientemente discutido en la literatura filosófica. En este trabajo nos centramos sobre este punto abordando el problema clásico de definir el alcance que puede tener la estrategia localizacionista en neurociencias. Atendemos al modo en que este problema se manifiesta hoy, tomando algunos ejemplos recientes de abordajes neurocientíficos caracterizados por estudiar el carácter dinámico de la actividad a gran escala en el cerebro. Tomamos en cuenta un número de limitaciones que presenta la resonancia magnética funcional, distinguiendo aquellas cuyo tratamiento pone en juego problemáticas de una índole no meramente técnica. A partir del análisis de algunas maneras en que los investigadores les hacen frente, sostenemos que existe una medida importante en que este tipo de estudios de neuroimagen pueden ser orientados sobre la base de supuestos y consideraciones teóricas generales. Concluimos que esta particular permeabilidad teórica de la resonancia magnética funcional es un factor central que incide sobre su estatus como evidencia neurocientífica.

Palabras clave: Resonancia magnética funcional, neuroimágenes, evidencia científica, neurociencias cognitivas, abordaje dinamicista.

1. Introducción

Las neurociencias cognitivas (en adelante, NC) han tenido un desarrollo formidable en los últimos años, en parte debido al uso creciente de las neuroimágenes funcionales. Entre éstas, la resonancia magnética funcional (en adelante, RMf) puede destacarse por la adopción difundida que ha tenido en el estudio de mecanismos neurobiológicos asociados a capacidades psicológicas. Esto se debió principalmente a las posibilidades que brinda, tratándose de una técnica no invasiva para el

estudio de la actividad neuronal en sujetos humanos y en el contexto del desempeño de alguna tarea cognitiva de interés.

Sin embargo, se han señalado diversas limitaciones técnicas que presenta esta herramienta, y también la tendencia a una utilización inadecuada de las neuroimágenes funcionales que aquella provee, cuando se las toma como “fotografías” o como única “evidencia” de la actividad cerebral (Klein, 2010; Roskies, 2007). Las consideraciones acerca de la medida en que esta técnica puede contribuir al campo de las NC comprenden desde posturas completamente escépticas, que refuerzan la importancia de contar con mejores modelos funcionales de las capacidades cognitivas (Uttal, 2003), hasta propuestas que han defendido que la RMf permite una observación casi directa de la actividad cerebral gracias a la sofisticación de los métodos de análisis de datos (Leopold & Wilke, 2005; Norman, Polyn, Detre, & Haxby, 2006). Entre estos extremos, autores como Constable (2011) han señalado que algunos de los límites que la herramienta presenta podrían ser afrontados de forma acotada a cada investigación, si se ajusta el balance deseado de precisión temporal/espacial de acuerdo a sus objetivos.

En el presente trabajo, intentaremos mostrar el carácter limitado de la RMf a la hora de ser tomada como evidencia en NC: a estos fines, apelaremos a la fuerte injerencia que tienen los presupuestos teóricos asumidos en cada investigación a la hora de seleccionar estrategias para el análisis de las señales captadas por el resonador y el procesamiento de los datos. Más precisamente, presentaremos algunos de los límites de la RMf y mostraremos las diferentes formas en que han sido abordados de acuerdo a distintos enfoques teóricos. A estos fines, introduciremos como ejemplo dos grandes tradiciones de trabajo en las NC, abordajes localizacionistas / modularistas, por un lado, y dinamicistas, por otro lado.

Sobre la base del uso de la RMf se han defendido históricamente ideas modulares y localizacionistas acerca de la actividad del cerebro con relación a distintas habilidades cognitivas: esto es, distintas áreas del cerebro instancian operaciones precisas y se relacionan entre sí de una manera discreta para dar lugar a una actividad cognitiva como puede ser la visión, el lenguaje, la percepción, entre otras. Este enfoque fue facilitado por las neuroimágenes funcionales puesto que permiten detectar áreas del cerebro activas en un momento determinado que se

corresponderían con actividades previamente delimitadas en modelos cognitivos.¹

A su vez, enfoques más dinamicistas han recurrido a la RMf como herramienta que permite capturar patrones de dinámicas neuronales emergentes, tomando al cerebro a nivel global como un sistema complejo. En estos casos, se han utilizado por lo general diferentes tipos de análisis matemáticos de los datos así como sofisticadas simulaciones computacionales. Es decir que la RMf ha sido utilizada como evidencia en apoyo a ideas modulares, localizacionistas, pero también como evidencia para modelos altamente dinámicos.

Lo que intentaremos mostrar es el modo en que la dimensión operativa involucrada en la utilización de la herramienta y del procesamiento de los datos es fuertemente dependiente de aquellos distintos abordajes. Cabe aclarar que este llamado de atención no pretende negar que esta técnica resulta ciertamente un recurso muy importante en diversas investigaciones a nivel exploratorio y que en el futuro con seguridad seguirá consolidándose. Más bien, nuestro mayor aporte aquí es descriptivo y consiste en desplegar la forma en que los supuestos generales que configuran grandes abordajes teóricos operan en la práctica experimental concreta.

La estructura del trabajo es la siguiente. Revisaremos en primer lugar algunos principios básicos del funcionamiento de la RMf como técnica de neuroimagen. Luego haremos una presentación de las dos tendencias generales mencionadas con atención al modo en que se manifiestan en las NC contemporáneas. A continuación, nos detendremos sobre algunas limitaciones de la RMf, que serán luego tomadas en cuenta para nuestra evaluación de su estatus en tanto que evidencia en este campo. Para esto, haremos foco sobre algunas diferencias importantes en el procesamiento y análisis de los datos arrojados por esta técnica, siendo

¹ Esta tendencia localizacionista sobre áreas cerebrales fue discutida recientemente por parte de los defensores de enfoques de redes distribuidas, que a partir de técnicas como la difusión de tensores, propusieron localizaciones más precisas a nodos y redes que no se circunscriben a un área. Esta perspectiva no será abordada en este trabajo, puesto que involucra otra técnica experimental. No obstante, es importante mencionar que estos abordajes continúan siendo secuenciales y modulares, dado que las actividades cognitivas siguen circunscribiéndose a redes discretas que se relacionan en tiempos bien definidos con otras redes.

estas diferencias notables entre abordajes localizacionistas/modulares y dinamicistas. Así, ofreceremos una mirada sobre la RMf concebida como una técnica amplia que puede ajustarse para favorecer resultados tanto dinamicistas como localizacionistas, y que en este sentido es muy permeable a los principios teóricos y los objetivos de la investigación bajo consideración.

2. Principios básicos de la RMf

La RMf es una técnica de neuroimagen no invasiva que permite inferir la actividad de distintos grupos neuronales cuando el sujeto experimental realiza distintas tareas cognitivas o conductuales. Esta combina dos principios básicos: por un lado, el uso de un campo magnético fuerte que impacta sobre el tejido cerebral y, por otro, las diferencias en el modo en que la hemoglobina en sangre reacciona a estos campos de acuerdo a su consumo diferencial de oxígeno.

El campo magnético generado por el resonador impacta en la materia generando una alineación de los núcleos de los átomos², es decir, el grado giratorio aleatorio que presentan por lo general los núcleos atómicos se alinea en dirección del campo magnético. Una vez que se deja de emitir la señal magnética, los núcleos retornan a su estado original: a esto se llama recuperación longitudinal y transversal. Los distintos tipos de materia tienen diferentes tiempos de recuperación de su estado original. Esto permite que en la resonancia magnética puedan distinguirse de manera nítida las estructuras cerebrales, como la sustancia gris, la sustancia blanca y el líquido cefalorraquídeo, en función de sus respectivos tiempos diferenciales de recuperación.

A los principios anteriormente esbozados, en la RMf se agrega la identificación de las zonas cerebrales en las que hay un mayor consumo de oxígeno. Esto es posible gracias a las diferencias en las propiedades magnéticas de la hemoglobina de acuerdo a que esté oxigenada o no. En el primer caso es diamagnética, es decir, presenta una débil repulsión

² Además de masa y carga eléctrica, los núcleos atómicos pueden poseer un momento angular intrínseco, llamado spin. El grado de giro del núcleo depende en gran medida de la cantidad de protones o neutrones que posee el átomo: sólo los núcleos con un número impar de protones o neutrones poseen spin. El núcleo del átomo de hidrógeno está constituido por solo un protón, por lo que posee un spin de magnitud $\frac{1}{2}$. El spin dota al átomo de ciertas propiedades magnéticas.

ante un campo magnético, mientras que sin oxígeno es paramagnética, o sea que posee una susceptibilidad magnética positiva y por ello es atraída hacia un campo magnético. Estas distintas propiedades conllevan a que se generen diferencias en cuanto a las inhomogeneidades en el campo magnético local de las zonas en las que hay consumo de oxígeno y en aquellas en las que no, lo cual afecta al tiempo de relajación transversal llamado T2*. De este modo, si se compara la señal (proporcional al tiempo de relajación T2*) en una misma región bajo dos condiciones, una de reposo y otra en la que esa región está activa, se encuentran distintos valores (Armony, Trejo-Martínez, & Hernández, 2012; Poldrack, Mumford, & Nichols, 2011).

El resonador magnético posibilita de esta manera un registro indirecto de la actividad neuronal a partir de sus demandas metabólicas de oxígeno. Las características de este tipo de registro conllevan a una menor precisión de los datos obtenidos en su aspecto temporal. Esto se debe al hiato temporal que existe entre el proceso de detección de la actividad hemodinámica en el cerebro (de una duración de segundos) y la activación neuronal (en el orden de los milisegundos), considerada responsable de los procesos cognitivos bajo estudio (Bandettini, 2006).

En la gran mayoría de los estudios con RMf se introducen algunas técnicas de pre-procesamiento de los datos; estas son: la realineación, que permite ajustar algunas variaciones en la posición del cerebro en las imágenes; la corrección de movimiento, por errores que se producen por movimientos leves; la corrección temporal entre capas; la suavización temporal; y el uso de plantillas estandarizadas que permiten disminuir la variabilidad estructural intersujeto y normalizar los datos obtenidos (para más detalles, Poldrack et al., 2011, capítulo 3). Además, los estudios con RMf incorporan diferentes tipos de diseños experimentales así como abordajes muy dispares para el tratamiento de los datos obtenidos. Sobre estos puntos, y en particular sobre cómo la definición de estos aspectos del trabajo experimental no es teóricamente “inocente”, nos vamos a centrar en buena parte de lo que sigue. Es oportuno sin embargo presentar rápidamente algunos de estos aspectos.

Con respecto a los diseños experimentales, los estudios pueden explorar el cerebro en reposo o bien depender de alguna tarea delimitada y, de este modo, de algún análisis previo de la misma. A la vez, en este último caso, pueden darse diferentes tipos de estructuras temporales para el desarrollo de los experimentos, en función de la presentación de los estímulos: en general, los experimentos se subdividen entre diseños

en bloque, en los que las condiciones de reposo y de actividad se alternan, o bien diseños relacionados con eventos, en los que los estímulos se presentan aleatoriamente o en función de diferentes intereses y necesidades del estudio. Los análisis de datos subsiguientes a su preprocesamiento pueden hacerse sobre todas las señales detectadas o sobre un conjunto delimitado, pueden ser de tipo univariado o multivariado (en función de si las pruebas estadísticas son aplicadas sobre cada vóxel tomado de modo independiente o no) y pueden incorporar diferentes tipos de técnicas estadísticas y métodos numéricos y computacionales (para más detalle véase Aguirre, 2010; Hanson & Bunzl, 2010; Lindquist, 2008; Poldrack *et. al.*, 2011).

Baste con esta brevísima introducción a algunos de los principios básicos de la RMf para tener una idea somera de su funcionamiento y aplicación neurocientífica. A continuación, ofrecemos una mirada sobre algunas aristas de la utilización de la RMf en las NC, destacando algunas diferencias metodológicas significativas entre los que pueden considerarse grandes abordajes neurocientíficos asentados sobre el uso de esta técnica. Este recorrido brindará una plataforma sobre la que luego desarrollaremos nuestra posición en torno del estatus de evidencia de la RMf en función de sus limitaciones y su relación con los intereses y presupuestos teóricos de los neurocientíficos que la utilizan.

3. La RMf y los abordajes neurocientíficos

Muchos neurocientíficos y filósofos de las neurociencias reconocen en la historia de la disciplina un predominio de ideas localizacionistas por sobre líneas de trabajo más holistas. Karl Friston, por ejemplo, es parte de un grupo de neurocientíficos que reconocen tendencias encontradas en la investigación actual en las NC. Büchel y Friston (2000) plantean estas tendencias en términos de un foco en la segregación funcional, por un lado, y un foco en la integración funcional, por otro. Estas pueden verse como grandes abordajes o líneas de trabajo en las NC, que influyen de modo general el modo en que los experimentos se llevan adelante y en que los modelos se elaboran.

En particular, Büchel y Friston (2000) afirman que las aún jóvenes neuroimágenes funcionales están dominadas por la doctrina de la segregación funcional, continuando de este modo el mencionado predominio histórico del localizacionismo en las neurociencias. La disputa de base está en la ponderación de la independencia en las

actividades asociadas a regiones cerebrales delimitadas respecto de otras regiones; estas actividades son las que estarían a la base de diferentes operaciones de procesamiento de la información que, se asume, intervienen en alguna capacidad cognitiva.

Si nos volcamos estrictamente en la RMf, también aquí hay que reconocer dentro de las NC contemporáneas una tendencia general netamente localizacionista en su uso (especialmente durante el primer período de exploración de las neuroimágenes funcionales). No puede desconocerse que esta tendencia tiene su origen en parte en el alcance que la técnica posibilita para la detección de diferentes propiedades. Hay que mencionar en particular las consabidas ventajas que esta técnica tiene para el estudio de las propiedades espaciales del cerebro y, específicamente, para la localización de las operaciones cognitivas necesarias para el desempeño de una tarea.

Esta tendencia localizacionista fue constatada por Tressoldi, Sella, Colheart y Umiltà (2012), en un análisis de un número de estudios sobre funciones cognitivas que involucraban el uso de RMf entre los años 2007 y 2011 (en revistas relevantes del campo, seleccionadas por su factor de impacto y reconocimiento por parte de la comunidad científica, como *Nature*, *Science*, *Journal of Cognitive Science*, entre otras). Intentaron determinar en qué medida los artículos analizados tenían como objetivo: (1) la localización de procesos cognitivos o (2) poner a prueba una teoría sobre los procesos cognitivos. Los resultados mostraron que en el 89% de los casos se había seguido el primer objetivo, es decir, la localización.

Con respecto a lo que hoy permanece de las posiciones localizacionistas clásicas —teniendo en cuenta la tendencia histórica general por la que las tesis localizacionistas se fueron modificando y moderando—, lo que se encuentra es una versión renovada del proyecto de asociar funciones psicológicas con partes delimitadas del cerebro: en este caso, las partes aludidas no necesitan estar delimitadas anatómicamente de modo preciso, sino que la tendencia dominante es la de individualizar redes operativas que pueden estar distribuidas en el cerebro pero que son responsables de operaciones cognitivas específicas y cuya contribución en el marco de la actividad psicológica global puede aislarse.

Estas ideas están asociadas de modo más o menos estrecho a la forma en que el modularismo se ha instalado en el campo de las NC. La acepción de modularidad de uso común entre los neurocientíficos, y de especial manera, en las comunidades dedicadas a las neuroimágenes

funcionales, se distancia en puntos importantes de la noción clásica fodoriana y a la vez tiene una conexión no desdeñable con la tradición localizacionista. A diferencia de la posición elaborada por Fodor en torno de la particular organización de nuestra arquitectura cognitiva y centrada en una noción muy elaborada de “módulo cognitivo”, los abordajes modularistas que nos ocupan se asientan en una idea más moderada e inespecífica de módulo.

Fodor (1986) definía a los módulos como sistemas de entrada que recogen información procedente del medio y la disponen en un formato accesible a sistemas cognitivos centrales. La noción de módulo desarrollada en las prácticas neurocientíficas, en cambio, no involucra necesariamente un compromiso con esta idea de una arquitectura jerárquica, y los módulos no adoptan sólo este tipo de procesamiento de entrada. A su vez, Fodor propuso una serie de características que permitirían identificar un módulo. Entre las más relevantes, podemos destacar la especificidad de dominio, su carácter innato, el hecho de que funcionan con más rapidez respecto de sistemas no modulares, que procesan la información de forma encapsulada y que están biológicamente realizados en estructuras cerebrales muy diferenciadas. Estas y otras características pueden identificarse en distinto grado.

Coltheart (2011) distingue esta definición fodoriana de una mucho más débil explicitada por Sternberg (2011) —y que de modo más general tiene aceptación en neurociencias—, de acuerdo con la cual dos sistemas cognitivos pueden considerarse modulares uno respecto del otro en el caso de que puedan ser modificados de manera independiente: es decir, hay al menos una variable que al ser manipulada afecta a sólo uno de los sistemas sin afectar al otro. Este criterio de “influencia selectiva” y de “modificabilidad separada” se ha usado de modo aun más deflacionado en neuropsicología, donde opera un criterio de “influencia diferencial” por el cual no es necesario que dos sistemas sean modificados de forma independiente para que puedan ser considerados módulos, sino que con sólo registrar cambios con una diferencia significativa es suficiente.

No estamos entonces considerando el modularismo en la versión de Fodor sino el uso de la noción más difundido entre los neurocientíficos (por ejemplo, Bunzl, Hanson, & Poldrack, 2010; Cabeza & Moscovitch, 2013; Friston & Price, 2011; Saxe, Brett, & Kanwisher, 2006). De particular relevancia para nuestros intereses es el modo en que esta noción se ha plasmado en el conocido paradigma experimental de la sustracción cognitiva en las NC. También este uso limitado hereda cierto parecido

de familia con los clásicos abordajes localizacionistas. La asunción fuerte aquí es que una operación cognitiva delimitada se corresponderá con la actividad del mismo sistema neuronal —esté asociado a una región o área específica o se encuentre más bien distribuido en el cerebro (ver, por ejemplo, Friston & Price, 2011)— tanto en el caso de que esté acompañada por otras operaciones diferentes como en el caso de que no lo esté.

El paradigma de sustracción cognitiva ha sido un verdadero caballo de batalla en la introducción de técnicas como la RMf en las NC contemporáneas. Constituye, además de un formato estándar y muy difundido para la investigación experimental con sujetos humanos sobre las bases neuronales de procesos cognitivos, un modo de controlar y aislar los fenómenos psicológicos de interés. En este tipo de paradigmas, se contrasta una condición experimental diseñada para activar una operación cognitiva específica en el marco de una tarea dada, con una condición de control en la que se evocan todas las operaciones necesarias para dicha tarea (esto es, presentes en la primera condición), excepto aquella operación de interés. Se asume así que las diferencias detectadas en la actividad neuronal entre una y otra condición se corresponden con la actividad responsable de la operación de interés.

Más allá de las críticas técnicas que este tipo de diseños ha recibido —en particular, respecto de la asunción de inserción pura, según la cual agregar una operación a un conjunto de otras operaciones no va a afectar a estas últimas—, nos interesa remarcar su lógica subyacente (que vale también para otros paradigmas afines, como el de la conjunción cognitiva), atada a supuestos sobre operaciones discretas que tienen una relación uno a uno con los procesos neuronales responsables. Es sobre esta base que diseños experimentales como el paradigma de sustracción ha funcionado como pilar de buena parte de la investigación asentada en neuroimágenes funcionales, y especialmente en la RMf. Esta conexión con los viejos principios localizacionistas ha tomado cuerpo en las diversas líneas de *human brain mapping* hoy existentes, en las que se asume una relación modular entre sistemas neuronales y procesos cognitivos (ver, por ejemplo, Saxe et al., 2006): “Existe un mapeo [*mapping*] uno-a-uno entre una región del cerebro y un compartimiento en nuestros modelos cognitivos de tipo compartimientos-y-flechas” (Bunzl et. al., 2010: 49; traducción de los autores). Nuevamente, lo que nos interesa destacar es la presencia de marcos generales que configuran estilos de trabajo experimental.

Algunos filósofos de las neurociencias también han colaborado a identificar y caracterizar grandes abordajes neurocientíficos en términos similares. De modo afín a la contribución mencionada de Friston y Büchel (2000), el artículo reciente de Abrahamsen y Bechtel (2012) ofrece una mirada filosófica para ilustrar este tipo de divergencias: en este caso, los autores ponen en contraste las que denominan concepciones reactivas, asociadas a lo que hemos llamado concepciones modularistas y localizacionistas, y concepciones endógenamente activas del cerebro. Mientras reconocen una fuerte preeminencia de las primeras en la historia de las neurociencias y de la psicología experimental, caracterizan un viraje reciente hacia las segundas, evaluándolo además como un cambio positivo en las NC.

En particular, los autores destacan el tratamiento de la variabilidad (tanto en un mismo sujeto experimental como entre diferentes pruebas) en las respuestas neuronales detectadas no ya como ruido sino como objeto de estudio en sí mismo. El foco del interés está así centrado en la descripción de esta variabilidad como un factor funcionalmente relevante y no despreciable como mero ruido: “El desafío es detectar y analizar patrones de [la actividad endógena del cerebro] y develar sus orígenes y funciones” (Abrahamsen & Bechtel, 2012, 344; traducción de los autores).

Un punto especialmente interesante para nuestros propósitos es que Abrahamsen y Bechtel (Cfr. 2012, 334) distinguen entre aportes desde la investigación experimental y aportes desde el modelado computacional, ambos en la dirección de consolidar la visión endógenamente activa del cerebro; entre los primeros, consideran el electroencefalograma (EEG), el registro de células aisladas y la RMf como técnicas que han colaborado al desarrollo de este enfoque sobre el cerebro. Este punto no es menor, en tanto que a menudo se asocian los abordajes llamados dinamicistas estrictamente con la investigación centrada en las simulaciones computacionales (por ejemplo, Sporns, 2011). Los autores presentan un conjunto de técnicas experimentales que han acompañado el crecimiento de la mencionada visión del cerebro en el contexto de la investigación de laboratorio.

Es importante aclarar que lo que aquí reconocemos más generalmente como un abordaje dinamicista para el estudio del cerebro, si bien se alinea de modo claro con el enfoque endógenamente activo delimitado por los autores, es más amplio. En particular, podemos afirmar que el enfoque dinamicista, tal como ha sido entendido por varios científicos

y filósofos adherentes al mismo (por ejemplo, Beer, 2000; Bressler & Kelso, 2001; Engel, Fries, & Singer, 2001; Freeman, 2005; Skarda & Freeman, 1987; Thompson & Varela, 2001; Wright & Liley, 1996, entre muchas otras líneas neurocientíficas; ver Ibáñez, 2007, y Venturelli, 2010, 2015, para algunos acercamientos filosóficos), constituye un conjunto de programas de investigación que comprende pero también excede un foco acentuado sobre la activación espontánea y endógena de las neuronas.

El principal foco teórico que aúna estos programas es la atención puesta sobre las dinámicas temporales y a gran escala en el cerebro. En general, esto ha sido acompañado por la adopción de técnicas analíticas y gráficas así como aparatos teóricos provenientes de la matemática de los sistemas dinámicos no lineales para la descripción de nivel alto de aspectos de la actividad neuronal. Ha sido subrayado, por ejemplo, un reconocimiento creciente de la importancia de concentrarse en las relaciones temporales tales como la sincronización de las descargas neuronales y, en general, la exploración experimental de propiedades coordinativas y auto-organizativas de conjuntos de neuronas (Cfr. Fingelkurts & Fingelkurts, 2004, 848). De este modo, la contraparte de un foco de este tipo es el relativo abandono de la idea de la neurona individual como unidad fundamental de análisis para la transmisión de información (ver, por ejemplo, Venturelli, 2015, y Yuste, 2015).

Cabe destacar que esta conceptualización del cerebro como sistema complejo, donde la información se tiende a concebir en el nivel de redes corticales, fue dándose en concomitancia con la adopción de las mencionadas técnicas en dinámica no lineal (por ejemplo, Strogatz, 1994), que posibilitan abordajes topológicos de la actividad neuronal. Esto fundamentalmente tiene que ver con la posibilidad que estas técnicas ofrecen para la caracterización de patrones espacio-temporales a gran escala, prescindiendo para esto de la consideración de un número de variables de nivel bajo y favoreciendo la detección de rasgos globales y temporalmente extendidos de las dinámicas neuronales bajo estudio. Ahora, más allá de que el enfoque dinamicista aquí delineado comportó un fortalecimiento de los abordajes teóricos y un mayor uso de simulaciones computacionales en la investigación, esto mismo repercutió y repercute también sobre su costado experimental, como intentaremos poner en evidencia más adelante.

Un aspecto central de esto último es la preponderancia de la dimensión temporal de los *data sets*, tanto en su obtención como en

su posterior análisis, por sobre de la dimensión espacial. Algunos ejemplos representativos pueden encontrarse en esfuerzos recientes de integración, como los trabajos de Buzsaki (2006) o de von der Malsburg, Phillips y Singer (2010), que refuerzan aun más la idea de un enfoque dinamicista presente en la investigación neurocientífica actual. Otra cara de esto es un fuerte desmedro de la dependencia de la actividad experimental y de modelado respecto de los clásicos modelos cognitivos secuenciales, que como vimos en el caso del paradigma de sustracción, subdividen una actividad cognitiva compleja en etapas discretas y de realización sucesiva. Conceptos como el de “acoplamiento” (por ejemplo, Beer, 2000) o de “causalidad recíproca” (Thompson & Varela, 2001) son a veces usados para mostrar la dificultad de una descomposición y una delimitación lineal y secuencial de la actividad cognitiva, y su reflejo en las operaciones neuronales subyacentes.

En línea con esto, dentro de los abordajes dinamicistas de corte más experimental, una tendencia ha sido la de estudiar el cerebro en reposo, en ausencia de estímulos o un determinado contexto de tarea (esto es ejemplificado a través del programa liderado por Dante Chialvo, que retomaremos más adelante). Ahora, más allá de que los sujetos experimentales estén desempeñando alguna actividad o bien estén en reposo, es el núcleo del foco teórico que guía la investigación experimental lo más distintivo de este tipo de enfoques así como también el tipo de tratamiento de los datos obtenidos: esto es, nuevamente, un foco centrado en dinámicas a gran escala en el cerebro y un tratamiento de los datos tendiente a explotar este aspecto de la actividad del cerebro.

A la vez, estas líneas de trabajo hacen principalmente foco en la actividad distribuida que se asume está presente en los generadores biológicos de las señales estudiadas, y en particular en sus dinámicas temporales. Esto es así más allá de un uso preferencial del EEG, el MEG y otras técnicas de mayor precisión temporal (ver, por ejemplo, Rippon, 2006). De este modo, el uso de la RMf en las NC cobija un número de programas de investigación claramente insertos en un enfoque dinamicista, tal como lo entendemos aquí. Puede decirse entonces que, más allá de la destacada tendencia localizacionista general, particularmente acentuada durante las primeras dos décadas de utilización de la RMf, es aun así notable cómo esta técnica ha sido y es usada de modos muy diversos y en el seno de líneas de trabajo muy distantes en el plano teórico, tanto modularistas o localizacionistas como también dinamicistas.

En lo que nos enfocaremos a continuación, en efecto, es un análisis más pormenorizado de diversos factores que intervienen en el uso de la RMf en contextos experimentales, y que, como mostraremos, pueden repercutir sobre la configuración de una línea de trabajo más cercana a lo que aquí hemos denominado abordajes localizacionistas y modularistas, por un lado, o más bien más cercana a los abordajes dinamicistas, por otro. Mostraremos en este sentido cómo la tensión caracterizada en este apartado —que a la vez atraviesa de algún modo toda la historia de las neurociencias, nutrida de debates clásicos entre localizacionistas y holistas— se manifiesta hoy, a la luz de las nuevas técnicas para la inspección del cerebro.

Cabe aclarar además que estas diferencias que delimitan las líneas de trabajo no necesariamente deben entenderse como fuente de una discrepancia teórica, vista si se quiere desde un contexto de justificación, esto es, no tanto como teorías en pugna, sino más bien como diferencias de base que marcan rumbos distintos y alejados en la búsqueda neurocientífica. Lo que justamente tiene interés epistemológico es mostrar en qué medida las diferencias en la utilización de la RMf son debidas a la influencia de supuestos y objetivos teóricos cristalizados en el desarrollo de los experimentos. Puntualmente, queremos destacar cómo la injerencia de estos supuestos es facilitada por el tipo de técnica de interés aquí, al considerar, por un lado, las limitaciones que presenta la RMf (sección 4.1) y, por otro, el modo en que se ha recurrido a diferentes diseños y análisis de datos para afrontarlas (sección 4.2). Sobre esta base, estaremos en condiciones de definir en qué sentido las mismas afectan el estatus de evidencia que tiene esta técnica para las NC (sección 4.3).

4. La RMf y su estatus como evidencia

4.1. Limitaciones técnicas en el uso de la RMf

Las limitaciones y desafíos metodológicos que presentan las investigaciones con RMf son diversos y provienen de diferentes fuentes. Existe una nutrida literatura en torno de las limitaciones que las técnicas de neuroimagen funcional exhiben: las contribuciones incluyen desde posicionamientos fuertemente críticos respecto del alcance y el aporte de estas técnicas (Hardcastle & Stewart, 2002; Uttal, 2003), pasando por análisis cautelares de la medida en que las neuroimágenes resultantes no pueden ser equiparadas a fotografías (Roskies, 2007), hasta estudios

que intentan mitigar cierto escepticismo de algunas preocupaciones infundadas o exageradas (Farah, 2014). No nos ocuparemos de un número de críticas externas a la utilización de la RMf, que tienen que ver por ejemplo con: el impacto que la divulgación de los resultados obtenidos a partir de las neuroimágenes puede tener sobre la opinión pública (Racine, Bar-Ilan, & Illes, 2005); el hecho de que la asignación de los colores sea arbitraria; o que su vivacidad y contraste sean engañosos o lleven a interpretaciones tendenciosas. Nos centraremos, más bien, en problemáticas de tipo técnico que aparecen en la conducción de los experimentos típicos en NC.

Aquí creemos importante distinguir entre dos clases de limitaciones, de muy distinto impacto epistemológico: limitaciones meramente técnicas, por un lado, y limitaciones técnicas permeables a diferentes tipos de sesgos teóricos. La primera clase de limitaciones son importantes en sí mismas, son más bien generales, y cabe esperar que un cuidado en su resolución o atenuación debiera repercutir globalmente sobre la adecuación de los resultados obtenidos en algún estudio dado. Limitaciones de este tipo son la determinación del tamaño de la muestra y el control sobre la tarea experimental (a los fines de minimizar la presencia de factores psicológicos indeseados o que puedan interferir con la capacidad bajo estudio). Las limitaciones que aquí nos interesan son las de la segunda clase: esto es, características del uso de la RMf que conducen a una serie de tomas de decisiones por parte de los investigadores, que a su vez son dirigidas o influenciadas de diverso modo por compromisos teóricos previos.

Puntualmente, en cada experimento con RMf existe un conjunto de decisiones técnicas que pueden ser tomadas de manera flexible a la hora de obtener, procesar y analizar los datos. Esto, que a simple vista podría parecer un asunto trivial (usualmente los instrumentos científicos deben ser calibrados para la correcta detección del fenómeno bajo estudio), constituye un problema significativo en el caso de la RMf dado que, como mostraremos, los presupuestos teóricos aquí dirigen de manera no desdeñable la forma de analizar e interpretar los datos arrojados por el resonador.

Atendiendo a esta segunda clase de problemas técnicos, encontramos dos cuestiones que revisten igual importancia y se encuentran intrincadas en la práctica; estas son: el carácter indirecto del registro que esta herramienta provee, y deficiencias estadísticas que usualmente han presentado los estudios que involucran la utilización de RMf.

Respecto del carácter indirecto de la RMf, existe una serie de características que contribuyen a que los datos obtenidos mediante esta técnica no sean transparentes. Como anticipamos, entre la actividad hemodinámica registrada y la activación neuronal hay un hiato temporal que va en detrimento de la sensibilidad del registro temporal de la RMf. Sumado a esto, la variabilidad intersujeto en la estructura de la vasculatura de las regiones o áreas cerebrales imposibilita una comparación robusta entre sus respuestas en el flujo sanguíneo. Finalmente, otras fuentes de ruido, tales como el movimiento de los sujetos en el resonador, los ritmos de respiración y latido cardíaco, introducen interferencias en las señales.

Estas características exigen la implementación de estrategias a la hora de recolectar, procesar y analizar los datos por parte de los investigadores. Las estrategias adoptadas serán distintas de acuerdo a si se busca identificar una región o red particular del cerebro relacionada a una función cognitiva, o si el objetivo es identificar dinámicas a gran escala; si se pretende una mayor exactitud para constreñir espacialmente las zonas en actividad o se intenta detectar con precisión los cambios temporales; entre otros posibles objetivos. Más adelante, mostraremos la forma en que estas estrategias han diferido en la medida en que se siguen distintos abordajes; por ahora, sólo nos interesa destacar cómo el carácter indirecto del registro y las particularidades señaladas contribuyen a que los datos obtenidos puedan ser afectados por distintas fuentes de ruido y por tanto poco confiables en caso de ser tomados en bruto.

Como anticipamos, también es preciso tener en cuenta algunas particularidades estadísticas que presentan estos estudios. En primer lugar, la amplia cantidad de vóxeles que deben ser considerados en cada estudio (aproximadamente 50000) hace dificultoso establecer un umbral estadístico que permita controlar la cantidad de falsos positivos en todo el volumen cerebral. Incluso cuando se establece un nivel de significancia conservador de $p < 0.001$ existe la probabilidad de que al menos 50 vóxeles hayan pasado el umbral por mero azar (Farah, 2014). A su vez, el establecimiento de un umbral muy estricto contribuye a que exista una sensibilidad a la detección sólo de activaciones muy preponderantes. Esto incrementa el riesgo de cometer también un error de tipo dos, es decir, tomar parte de las activaciones interesantes como inactivas (falsos negativos). Estos problemas son aun mayores en las investigaciones de corte localizacionista, en las que suelen establecerse

comparaciones múltiples a fines de identificar las zonas principalmente asociadas a una función cognitiva.

Las dificultades estadísticas mencionadas a su vez se complejizan y profundizan si se consideran las distintas fuentes de ruido anteriormente mencionadas, la cantidad usualmente escasa de sujetos experimentales en estos estudios y la falta de replicación de los experimentos. Todas estas condiciones contribuyen muchas veces a la imposibilidad de determinar la presencia del efecto bajo estudio con un intervalo de confianza alto (Yarkoni, 2009; Yarkoni & Braver, 2010).

Respecto de estas particularidades estadísticas, existen también procedimientos para incrementar la confiabilidad de los datos. El problema es que, nuevamente, dichos procedimientos no involucran reglas generales para todos los estudios con RMf, sino que se encuentran fuertemente vinculados a presupuestos teóricos específicos. De modo que, si el interés es una identificación más confiable de un área cerebral vinculada a una actividad cognitiva, se propondrán estrategias tales como el uso de localizadores funcionales (fROI), diseños factoriales, la realización de meta-análisis (para aumentar la cantidad de casos), incluso mediante herramientas automatizadas como aquellas de *data mining* y *machine learning* (Yarkoni, Poldrack, Nichols, Van Essen, & Wager, 2011; Yarkoni, Poldrack, Van Essen, & Wager, 2010). Todos estos procedimientos permitirán identificar una zona activa en relación a una función cognitiva con una mayor potencia estadística.

En una dirección completamente distinta, si los objetivos de la investigación son los de identificar características determinadas en las dinámicas de la actividad cerebral, se recurrirá a una modelización matemática que permita exaltar estos patrones. A estos fines, se ha recurrido por ejemplo a introducir secciones de Poincaré, engrosar matemáticamente la señal detectada a nivel espacial y temporal, el uso de simulaciones computacionales, entre otros recursos en los que profundizaremos más adelante.

Farah, en un intento por defender los distintos procedimientos estadísticos que deben llevarse a cabo sobre los datos de RMf, afirma: "Cuando se llevan a cabo de manera adecuada, los análisis estadísticos profundizan nuestra comprensión de los datos y de la realidad más extensa de la que fueron extraídos" (Farah, 2014, 25; traducción de los autores). Lo que intentamos mostrar aquí es que en el caso de la RMf, ante las dificultades estadísticas que se presentan por las fuentes de ruido y la cantidad de vóxeles que deben ser analizados, se debe

apelar a estrategias para el aumento de la confiabilidad de los datos y de su potencia estadística, estrategias que suelen estar estrictamente relacionadas a los objetivos de cada investigación. Las mismas más que “profundizar nuestra comprensión” establecen un recorte estadístico sobre los segmentos de datos que se consideran más interesantes *a priori*.

4.2. Presupuestos teóricos y análisis de datos

Nos dedicamos ahora a un análisis más detallado de las estrategias que se han adoptado a la hora del procesamiento y análisis de los datos en distintos estudios, en especial en aquellos con un enfoque de tipo modularista/localizacionista y estudios dentro de un abordaje dinamicista. Estos enfoques han divergido sobre todo en tres dimensiones centrales: (1) la priorización de aspectos o bien espaciales o bien temporales; (2) la focalización sobre una región o la identificación de patrones generales de activación en el cerebro; y, en relación con lo anterior, (3) el tipo de análisis matemático que se realiza sobre los datos. Mediante un análisis de estas diferencias, intentaremos mostrar cómo en detalles concretos relacionados a las prácticas experimentales en las NC, se puede observar que ante la falta de una noción sólida de evidencia para el caso de la RMf, tal como es utilizada actualmente en el campo, es más fuerte el peso de las suposiciones que alimentan los abordajes en la obtención e interpretación de los datos.

Con respecto al primer punto, los abordajes localizacionistas han privilegiado aspectos espaciales, intentando relacionar algunas capacidades psicológicas y sus sub-funciones con determinadas áreas cerebrales de la forma más robusta y precisa posible. Es con este interés que en estas investigaciones se analizan estadísticamente los datos registrados por el resonador buscando determinar qué áreas/vóxeles sobrepasan cierto umbral de activación de manera confiable, en asociación a una actividad. Esta estrategia se conserva tanto en los diseños experimentales de bloque como en los diseños relacionados con eventos. En el caso de los diseños de bloque, se combinan períodos de estímulo o tarea con períodos de descanso;³ sobre la base del análisis estadístico de

³ El descanso en estos casos no es necesariamente inactividad sino ausencia de la tarea o estímulo relevante. Esto puede involucrar una actividad de base que permita contrastar la situación experimental con otra que requiera ciertas actividades presentes en la actividad experimental pero no asociadas a la capacidad en estudio. Por ejemplo, en un experimento de reconocimiento

los primeros y su contrastación con los segundos, puede establecerse qué áreas tienen mayor respuesta hemodinámica relacionada a la actividad con cierta potencia estadística. En estos casos no se focalizan cambios temporales, sino que todos los bloques relacionados con la capacidad bajo estudio son analizados como un mismo corpus de datos.

En el caso de los diseños relacionados con eventos sucede algo similar. La principal diferencia es que en estos casos, dado que la potencia estadística es menor que en los diseños de bloque —por ser menor la muestra de capturas del resonador relacionadas con la capacidad bajo estudio y porque sufren de más variaciones espontáneas—, se intenta eliminar las activaciones más débiles, que son interpretadas como ruido. De esta manera, pueden ser identificadas como activas de manera confiable aquellas áreas donde la respuesta hemodinámica es muy significativa. De nuevo, esto a la vez que permite una mayor precisión espacial involucra una detección muy pobre de los cambios temporales, justamente por no ser el foco de estudio.

En los estudios que adoptan un enfoque dinamicista, por el contrario, se atiende a los cambios de estado del sistema de un momento a otro. Es por este motivo que se privilegian tiempos de repetición cortos a fines de aumentar la sensibilidad temporal⁴, y se busca caracterizar las fluctuaciones en las activaciones a nivel general. Las investigaciones en esta línea, a su vez, suelen incluir una modelización matemática que permite inferir el tiempo real de activación de las neuronas a partir de la consideración de los tiempos de fluctuación en la respuesta hemodinámica. Esto permite capturar los cambios de estado de una forma más sensible, aunque se pierde en algún grado la precisión espacial.

En estrecha relación con lo anterior, encontramos el segundo punto de divergencias, que involucra la medida en que el objetivo reside en la

de emociones en fotografías, los bloques de descanso podrían consistir en la observación de imágenes neutras.

⁴ El descanso en estos casos no es necesariamente inactividad sino ausencia de la tarea o estímulo relevante. Esto puede involucrar una actividad de base que permita contrastar la situación experimental con otra que requiera ciertas actividades presentes en la actividad experimental pero no asociadas a la capacidad bajo estudio. Por ejemplo, en un experimento de reconocimiento de emociones en fotografías, los bloques de descanso podrían consistir en la observación de imágenes neutras.

focalización de una región o en la identificación de patrones generales de activación en el cerebro. En los estudios de corte localizacionista, una estrategia común es utilizar localizadores funcionales como lo son las regiones funcionales de interés (fROI). Esto consiste en predefinir un área de interés y registrar los cambios y variaciones sólo en esa área; de este modo, los investigadores reducen la anatomía funcional a una sola región del cerebro que se define operacionalmente por el localizador funcional. Saxe, Brett y Kanwisher (2006) han señalado que esta estrategia resulta muy fructífera a la hora de establecer localizaciones más exactas y definidas, con una potencia estadística adecuada.

Otros autores sin embargo han sido críticos respecto de su uso, argumentando que restringe las localizaciones y no permite una buena sensibilidad al contexto, proponiendo en este sentido diseños alternativos que podrían ser aun más adecuados a los fines localizacionistas, como por ejemplo el uso de diseños factoriales (Friston, Rotshtein, Geng, Sterzer, & Henson, 2006). En estos casos no se realiza una preselección de una región de interés, sino que el diseño incluye una variedad de condiciones experimentales que permiten contrastar las activaciones cerebrales asociadas a distintas tareas, y así identificar qué regiones cerebrales se encuentran más fuertemente asociadas a la función cognitiva bajo estudio.

Desde un enfoque dinamicista, también se manipulan los datos para poder identificar la presencia de patrones de comportamiento dinámico. En estos casos, sin embargo, la estrategia de análisis, en lugar de restringir la información considerada, ha consistido en tomar en cuenta todos los vóxeles e introducir algunos parámetros que permitan identificar patrones dinámicos y correlaciones de gran alcance en la actividad neural (por ejemplo, la propiedad de auto-organización o metaestabilidad). En esta dirección, una técnica que ha sido utilizada es la de “grano grueso” que consiste en aumentar mediante fórmulas de física estadística el tamaño de los vóxeles (aspecto espacial) y las unidades de tiempo en que se producen las activaciones (aspecto temporal). Esto permite comparar la actividad cerebral de gran escala con segmentos de menor escala, tanto en grupos neuronales distantes en el cerebro como en distintos momentos de la actividad cerebral. Mediante este tipo de comparación, por ejemplo, se ha dado apoyo a la hipótesis de que las distintas escalas de las dinámicas son autosimilares, siendo este un atributo muy específico de los sistemas complejos con dinámicas de criticalidad (Expert *et. al.*, 2011).

Finalmente, con respecto al alcance que asume el tratamiento matemático de las señales captadas por el resonador, cabe mencionar que mientras en los abordajes localizacionistas/modularistas tradicionales se introducen análisis estandarizados y relativamente automatizados, en los abordajes dinamicistas existe un mayor grado de libertad para el análisis de los datos. En estos casos, los datos son manipulados matemática o computacionalmente de modo que permitan inferir determinados patrones dinámicos de actividad. A estos fines, por ejemplo, Tagliazucchi, Balenzuela, Fraiman y Chialvo (2012) realizaron una investigación sobre dinámicas de criticalidad, tomando una sección de Poincaré para establecer el punto de procesamiento de los datos. Esto les permitió amplificar el estudio de las relaciones en determinadas zonas e identificar patrones de avalanchas neuronales que se correlacionan a gran escala, lo que permite inferir una actividad dinámica de auto-organización.

Otro ejemplo de este tipo de abordajes es el trabajo de Haimovici, Tagliazucchi, Balenzuela y Chialvo (2013), quienes generaron un modelo computacional de la posible actividad dinámica del cerebro en estado de reposo. Para ello, utilizaron datos sobre la organización estructural del cerebro, e introdujeron una fórmula dinámica simple correspondiente al análisis físico estadístico de sistemas críticos. En una segunda instancia, se comparó el modelo resultante con la actividad del cerebro en estado de reposo detectada mediante el uso de RMf. En esta comparación se encontraron correspondencias muy significativas entre las imágenes logradas por el modelo y las neuroimágenes. Además, los patrones de dinámicas críticas permitieron simular en el modelo computacional características muy particulares de las redes en estado de reposo encontradas en el cerebro real como lo son las correlaciones a gran escala.

Un caso que se encuentra en un término intermedio entre este tipo de análisis de datos y los abordajes más claramente localizacionistas, centrados por ejemplo en el uso de localizadores funcionales, es el análisis multivariado de patrones. Esta estrategia para el análisis de datos se diferencia de los análisis univariados más comunes, en los que se aplica una prueba estadística a cada vóxel tomado separadamente, para lo cual se filtran los datos de vóxeles vecinos, se toma como significativa la activación máxima del vóxel y no se toma en cuenta la variabilidad interna al mismo. Por otra parte, los análisis multivariados de patrones pueden ser aplicados a grandes zonas del cerebro o a todo

el cerebro, y toman en cuenta toda la información de las zonas de interés así como las activaciones más débiles de cada vóxel. Se apoyan para esto en clasificadores de patrones de *machine learning* que representan la información como un vector n -dimensional, donde n es el número de factores o de vóxeles en el patrón de actividad neuronal.

El punto interesante es que, mientras los análisis univariados tienden a limitar el interés en la localización funcional, los análisis multivariados amplían el espectro de preguntas experimentales, considerando en particular el estudio comparativo de patrones de actividad en diferentes áreas del cerebro así como la influencia recíproca entre ellas, tal como se muestran en diferentes situaciones experimentales. Haxby (2010), por ejemplo, explícitamente asocia la selección de uno u otro método a asunciones subyacentes respecto de la estructura básica de la organización del cerebro: específicamente, señala la limitación de los típicos análisis univariados en la medida en que sólo pueden representar la actividad neuronal como alta o como baja en función de alguna tarea desempeñada, y, como contraparte, la amplitud de la representación de la actividad neuronal como un vector multidimensional.

4.3. En torno al estatus de la RMf como evidencia en las NC

A partir de las diferencias expuestas, se puede observar el modo en que los datos tomados de la RMf se encuentran fuertemente sesgados por los presupuestos teóricos y los objetivos de los experimentadores. En particular, los rasgos generales que, como vimos, caracterizan de modo global la familia de abordajes localizacionistas, por un lado, y dinamicistas, por otro, se manifiestan de modos concretos en el uso que se da a esta técnica. Esto comprende tanto los aspectos del sistema estudiado que se priorizan en los experimentos como aspectos diversos relacionados con la obtención y el tratamiento de los datos arrojados. Ahora, en el fondo lo que subyace a esta situación, y aquello que la posibilita, es el carácter amplio y versátil de la técnica en cuestión.

Tal como hemos mostrado a lo largo de este trabajo, la resonancia magnética funcional es una técnica muy compleja, tanto por el tipo de detección que viabiliza como por el conjunto de condiciones para su utilización que ponen en juego aspectos desconocidos o poco claros de los fenómenos neuronales estudiados y de la misma modalidad para su detección. Como ya hemos aludido, esto ha llevado a una serie de posicionamientos críticos y llamados de atención en torno de aquello

que puede ser estudiado en las NC a través de técnicas de este tipo. Aquí sin embargo no hemos querido sumar sin más a esta clase de contribuciones, sino analizar la técnica y en particular su estatus como evidencia desde la óptica de su permeabilidad teórica y la consiguiente amplitud de roles que puede asumir en el contexto de una u otra línea de investigación.

Lo anterior, creemos, está fundamentalmente asociado, por un lado, al carácter indirecto de la RMf como método de detección de la actividad del cerebro significativa para el desempeño de las funciones cognitivas bajo consideración, y, por otro lado, al estado del arte en NC por el cual todavía existe un importante desconocimiento sobre aspectos centrales del funcionamiento del cerebro con relación a los fenómenos cognitivos. Estos puntos se pueden plantear también, como hicimos, en términos de las sustantivas limitaciones asociadas a la RMf y que afectan los criterios que sostienen la confiabilidad de la evidencia en las NC asentadas sobre esta técnica.

En este sentido, acordamos con Bogen (2002) en que existen serias dificultades para sostener una noción robusta de evidencia para el caso de datos extraídos a partir de la RMf en NC. En concomitancia con los aspectos considerados previamente, el autor remarca especialmente un conjunto de cuestiones que hacen al estado del arte de la investigación en este campo: entre ellos, se destacan la dificultad para definir los umbrales bajo criterios sólidos, la selección de la forma de onda de referencia (denominada función de respuesta hemodinámica) en tanto la respuesta hemodinámica puede variar en función de la zona de la corteza así como entre sujetos experimentales y, finalmente, los problemas de la relación señal / ruido que acarrea el promediado de la señal. La tesis de Bogen consiste en diferenciar el carácter de evidencia de la RMf en función de estas cuestiones del que tienen otras técnicas más robustas, como por ejemplo la microscopía de coherencia óptica en biología celular que allí toma para ejemplificar.

Si bien acordamos con el autor en que parte de lo que debiera extraerse de esto es un mayor cuidado a la hora de interpretar los datos arrojados en los estudios de este tipo, nuestra principal contribución está en visibilizar el modo como el carácter indirecto de la detección con RMf, así como el desconocimiento involucrado en diversos aspectos de su utilización, toma la forma de direcciones divergentes en la investigación. En particular, hemos caracterizado estas direcciones en términos de tendencias encontradas relativas a un foco sobre la localización de

funciones cognitivas en áreas delimitadas del cerebro: hemos mostrado estas diferencias como decisiones puntuales que inciden sobre la capacidad de la RMf para detectar diferentes rasgos de las operaciones de sistemas neuronales con relación a diversos fenómenos cognitivos.

A nuestro parecer, es fundamental entender la técnica de interés aquí como un abordaje multifacético para el estudio del cerebro que permite, en una gran medida, un uso no discrecional pero sí fuertemente influenciado por supuestos teóricos —esto es, relativos al modo de operación del cerebro de cara a requerimientos cognitivos— y objetivos teóricos —en la medida en que se asuman relevantes y tratables— que a menudo no se tienen presentes dentro del desarrollo de un estudio. Esta suerte de maleabilidad de la técnica se manifiesta, tal como lo hemos podido mostrar, en diferentes puntos en el marco de un estudio experimental pero, a la vez, de modo hasta cierto punto integrado en función de estrategias más o menos localizacionistas/modularistas o más o menos dinamicistas. Tener esto en cuenta a la hora de planificar y llevar adelante estudios con RMf no aporta un mero sentido pesimista o negativo para la interpretación de los datos obtenidos sino una comprensión más fiel al tipo de herramienta en uso y una mayor conciencia del tipo de abordajes que se ponen en juego al adoptarla.

Un punto delicado, al que Bogen también hace referencia y sobre el que creemos es importante seguir reflexionando, tiene que ver con la relación de la RMf con otras técnicas de neuroimagen y, en general, de detección de distintas propiedades neuronales: los aspectos que están más allá del control del experimentador en la producción de los datos, además de ser numerosos, no pueden ser verificados de modo independiente. De este modo, un análisis riguroso de los errores eventuales en los que se puede incurrir no puede aplicarse a la evaluación de las neuroimágenes. A la vez, esta situación alimenta una mirada que ponga en relación los abordajes localizacionistas, por un lado, y dinamicistas, por otro, con el modo en que los resultados obtenidos con una técnica limitada como la RMf pueden complementarse con otras técnicas disponibles en las NC contemporáneas. Ahora, una advertencia general que sí puede extraerse de nuestras reflexiones tiene que ver con la evaluación necesariamente limitada de una técnica como la RMf si se la hace en aislamiento o independientemente de resultados convergentes obtenidos a partir de otras técnicas de exploración del cerebro.

En línea con lo anterior, es importante recalcar que una consecuencia principal de nuestro análisis en ningún modo es un desprecio por la

utilidad de la técnica o una evaluación negativa de su confiabilidad para las neurociencias: el rol de la RMf como una fuente complementaria de datos, por ejemplo para orientar la selección y desarrollo de tratamientos en usos clínicos no se pone en cuestión. Más bien, el punto central que debe ser extraído de nuestro análisis es la medida importante en que la producción e interpretación de los datos obtenidos a partir de cualquier abordaje en la adopción de esta técnica en contextos experimentales en las NC es afectada por la presencia de asunciones teóricas. Estas pueden ser más o menos explícitas y pueden tener una mayor o menor influencia en el desarrollo de un estudio, pero el mismo tipo de técnica en juego define su participación ostensible en la búsqueda experimental.

Lo que entonces nos ha ocupado es una caracterización rigurosa del estatus de evidencia de la RMf con atención a este aspecto particular, que ha sido ilustrado aquí apelando a las divergencias entre tendencias localizacionistas y dinamicistas para el estudio del cerebro. Creemos fundamental destacar la importancia, tanto para el filósofo de las neurociencias como para el científico activo, de apreciar cómo estas diferencias que pueden caracterizarse en un plano teórico general, se manifiestan de modo concreto en aspectos técnicos que hacen a la adopción de la RMf. En última instancia, el alcance de estas consideraciones sobre la interpretación de los datos y hasta dónde estos pueden contrastar alguna hipótesis dependerá de cada caso. El nuestro pretendió ser un aporte general a la comprensión de la naturaleza de la RMf en tanto que fuente de evidencia para las NC contemporáneas.

5. Conclusión

En el presente trabajo abordamos la RMf como una de las técnicas sin lugar a dudas más importantes y de uso más difundido en las NC. Nuestro interés estuvo centrado en evaluar el estatus de evidencia que reviste esta técnica en la investigación neurocientífica contemporánea, atendiendo en particular al modo marcadamente diferencial en que se la ha adoptado. Luego de una breve descripción de su funcionamiento y de algunos aspectos básicos de su utilización en el sector, caracterizamos dos grandes tendencias teóricas vigentes, que denominamos localizacionistas / modularistas por un lado y dinamicistas por otro, que se distancian en diversos puntos del estudio de la actividad de sistemas neuronales en función del desempeño cognitivo de sujetos experimentales. Mostramos que, si bien no se trata de teorías irreconciliables, sí pueden reconocerse

rasgos generales de dos estrategias divergentes que tienen claras repercusiones en las prácticas experimentales y que son reconocidas tanto por neurocientíficos como por filósofos de las neurociencias.

En el apartado central del trabajo, nos volcamos sobre el problema de la evidencia en la RMf. Discutimos algunos de los límites reconocidos de la técnica y las implicancias que estos tienen con relación a dicho problema: en particular, distinguimos dos tipos de limitaciones, uno de los cuales tiene consecuencias relevantes para definir el alcance de la RMf como evidencia para los estudios en el campo. Dentro de sus limitaciones técnicas, sostuvimos que existen algunas que son susceptibles de control por parte del investigador del caso, control que a su vez se encuentra asentado sobre supuestos y objetivos teóricos diversos. Este notable hecho es debido tanto al carácter indirecto del registro que esta técnica posibilita como por el estado aún marcado de desconocimiento sobre el funcionamiento del cerebro y sobre ese mismo registro.

Mostramos así que algunas limitaciones no meramente técnicas, pero que son inherentes al tipo de registro indirecto que esta herramienta involucra, propician una considerable flexibilidad en el modo en que se fijan los parámetros y en el tratamiento de los datos: nos centramos específicamente en la relación entre aspectos espaciales y temporales de la actividad neuronal, en la definición de las escalas de detección de los estudios y en el tipo de modelización matemática realizada. Presentamos el modo en que esta flexibilidad favorece divergencias ostensibles en el uso de la RMf, y que se manifiestan en aspectos concretos del desarrollo de un estudio experimental, divergencias que están principalmente en línea con el abordaje general adoptado por los investigadores, o bien localizacionista/modularista, o bien dinamicista.

A partir del análisis realizado, ilustrado a través de algunos ejemplos recientes de investigaciones con RMf, llamamos finalmente la atención sobre el carácter moderado de esta técnica como fuente de evidencia para las NC y la consiguiente importancia de una interpretación más cuidadosa de los resultados obtenidos a través de la misma. Cabe insistir en que este resultado no debe entenderse en un sentido crítico respecto de los estudios con neuroimágenes considerados. De lo que se trata no es criticar sin más a la RMf: más bien lo que queremos destacar es una caracterización ponderada del tipo de herramienta en juego y, fundamentalmente, el hecho de que su adopción constituye un abordaje complejo muy permeable a supuestos teóricos preliminares o

subyacentes, que muchas veces no son tenidos presentes en contextos de trabajo experimental.

Afirmamos en este sentido que la RMf se ve afectada de un modo claro por una dependencia considerable de las asunciones y los objetivos teóricos que guían la investigación, en la medida en que estos dirigen el desarrollo de los estudios hacia direcciones muy alejadas y a veces divergentes. Hemos sustentado esta tesis en torno de esta técnica experimental mostrando los diversos puntos en que las asunciones y los objetivos teóricos que caracterizan dos abordajes generales vigentes en las NC se ven reflejados en su utilización. En esta misma línea, consideramos además que un buen horizonte en dirección de ampliar los alcances de esta técnica sería emplear múltiples modos independientes de evidencia para complementar los resultados obtenidos. Esta propuesta nos lleva a un campo aun más complejo y su análisis demanda reflexiones epistemológicas ulteriores, que serán abordadas en futuros trabajos

Agradecimientos

Quisiéramos reconocer la contribución de dos revisores anónimos, cuyos comentarios y observaciones nos ayudaron a mejorar en varios puntos el presente trabajo.

Referencias bibliográficas

- Abrahamsen, A., & Bechtel, W. (2012). From Reactive to Endogenously Active Dynamical Conceptions of the Brain. In *Philosophy of Behavioral Biology*. K. S. Plaisance & T. A. C. Reydon (Eds.) (pp. 329–366). Springer Netherlands. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-007-1951-4_16
- Aguirre, G. K. (2010). Experimental Design Analysis. *BOLD fMRI: A Guide to Functional Imaging for Neuroscientists*, 55.
- Armony, J. L., Trejo-Martínez, D., & Hernández, D. (2012). Resonancia Magnética Funcional (RMf): Principios y Aplicaciones en Neuropsicología y Neurociencias Cognitivas. *Neuropsicologia Latinoamericana*, 4(2). Retrieved from http://www.neuropsicolatina.org/index.php/Neuropsicologia_Latinoamericana/article/view/103
- Bandettini, P. (2006). Functional magnetic resonance imaging. In *Methods in Mind*. C. Senior, T. Russell, & M. Gazzaniga (Eds.) (pp. 193–235). Cambridge, Mass.; London: The MIT Press.

- Beer, R. D. (2000). Dynamical Approaches to Cognitive Science. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(3), 91–99.
- Bogen, J. (2002). Epistemological Custard Pies From Functional Brain Imaging. *Philosophy of Science*, 69(3), 59–71.
- Bressler, S. L., & Kelso, J. a. S. (2001). Cortical coordination dynamics and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(1), 26–36.
- Büchel, C., & Friston, K. (2000). Assessing interactions among neuronal systems using functional neuroimaging. *Neural Networks: The Official Journal of the International Neural Network Society*, 13(8-9), 871–882.
- Bunzl, M., Hanson, S. J., & Poldrack, R. A. (2010). An Exchange about Localism. In *Foundational Issues in Human Brain Mapping*. S. J. Hanson & M. Bunzl (Eds.) (pp. 49–54). The MIT Press. Retrieved from <http://mitpress.universitypressscholarship.com/view/10.7551/mitpress/9780262014021.001.0001/upso-9780262014021-chapter-5>
- Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. Oxford University Press. Retrieved from <http://www.oxfordscholarship.com/view/10.1093/acprof:oso/9780195301069.001.0001/acprof-9780195301069>
- Cabeza, R., & Moscovitch, M. (2013). Memory Systems, Processing Modes, and Components: Functional Neuroimaging Evidence. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, 8(1), 49–55. <http://doi.org/10.1177/1745691612469033>
- Coltheart, M. (2011). Methods for modular modelling: Additive factors and cognitive neuropsychology. *Cognitive Neuropsychology*, 28(3-4), 224–240. <http://doi.org/10.1080/02643294.2011.587794>
- Constable, R. T. (2011). Challenges in fMRI and Its Limitations. In *Functional Neuroradiology*. S. H. Faro, F. B. Mohamed, M. Law, & J. T. Ulmer (Eds.) (pp. 331–344). Springer US. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-0345-7_19
- Engel, A. K., Fries, P., & Singer, W. (2001). Dynamic predictions: oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2(10), 704–716. <http://doi.org/10.1038/35094565>
- Expert, P., Lambiotte, R., Chialvo, D. R., Christensen, K., Jensen, H. J., Sharp, D. J., & Turkheimer, F. (2011). Self-similar correlation function in brain resting-state functional magnetic resonance imaging. *Journal of The Royal Society Interface*, 8(57), 472–479. <http://doi.org/10.1098/rsif.2010.0416>
- Farah, M. J. (2014). *Brain images, babies, and bathwater: critiquing critiques of functional neuroimaging*. The Hastings Center Report, Spec No, S19–30. <http://doi.org/10.1002/hast.295>

- Fingelkurts, A. A., & Fingelkurts, A. A. (2004). Making complexity simpler: multivariability and metastability in the brain. *The International Journal of Neuroscience*, 114(7), 843–862. <http://doi.org/10.1080/00207450490450046>
- Fodor, J. A. (1986). *La modularidad de la mente: un ensayo sobre la psicología de las facultades*. Madrid: Ediciones Morata.
- Freeman, W. J. (2005). A field-theoretic approach to understanding scale-free neocortical dynamics. *Biological Cybernetics*, 92(6), 350–359. <http://doi.org/10.1007/s00422-005-0563-1>
- Friston, K. J., Rotshtein, P., Geng, J. J., Sterzer, P., & Henson, R. N. (2006). A critique of functional localisers. *NeuroImage*, 30(4), 1077–1087. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.08.012>
- Friston, K., & Price, C. (2011). Modules and brain mapping. *Cognitive Neuropsychology*, 28(3-4), 241–250. <http://doi.org/10.1080/02643294.2011.558835>
- Haimovici, A., Tagliazucchi, E., Balenzuela, P., & Chialvo, D. R. (2013). Brain Organization into Resting State Networks Emerges at Criticality on a Model of the Human Connectome. *Physical Review Letters*, 110(17), 178101. <http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.178101>
- Hanson, S. J., & Bunzl, M. (Eds.) (2010). *Foundational Issues in Human Brain Mapping*. MIT Press.
- Hardcastle, V. G., & Stewart, C. M. (2002). What Do Brain Data Really Show? *Philosophy of Science*, 69(3), 572–582.
- Haxby, J. V. (2010). Multivariate Pattern Analysis of fMRI Data: High-Dimensional Spaces for Neural and Cognitive Representations. In *Foundational Issues in Human Brain Mapping* (pp. 55–68). S. J. Hanson & M. Bunzl (Eds.) The MIT Press. Retrieved from <http://mitpress.universitypressscholarship.com/view/10.7551/mitpress/9780262014021.001.0001/upso-9780262014021-chapter-6>
- Ibáñez, A. (2007). Complexity and cognition: a meta-theoretical analysis of the mind and brain as a topological dynamical system. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 11(1), 51–90.
- Klein, C. (2010). Images Are Not the Evidence in Neuroimaging. *British Journal for the Philosophy of Science*, 61(2), 265–278.
- Leopold, D. A., & Wilke, M. (2005). Neuroimaging: Seeing the Trees for the Forest. *Current Biology*, 15(18), R766–R768. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2005.08.055>
- Lindquist, M. A. (2008). The statistical analysis of fMRI data. *Statistical Science*, 23(4), 439–464.

- Lindquist, M. A., & Wager, T. D. (2014). Principles of functional Magnetic Resonance Imaging. In *Handbook of Neuroimaging Data Analysis*. London: Chapman & Hall. Retrieved from <http://wagerlab.colorado.edu/files/papers/fMRICapter.pdf>.
- Norman, K. A., Polyn, S. M., Detre, G. J., & Haxby, J. V. (2006). Beyond mind-reading: multi-voxel pattern analysis of fMRI data. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(9), 424–430. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2006.07.005>
- Poldrack, R. A., Mumford, J. A., & Nichols, T. E. (2011). *Handbook of Functional MRI Data Analysis*. New York: Cambridge University Press.
- Racine, E., Bar-Ilan, O., & Illes, J. (2005). fMRI in the public eye. *Nature Reviews. Neuroscience*, 6(2), 159–164. <http://doi.org/10.1038/nrn1609>
- Rippon, G. (2006). *Electroencephalography*. Retrieved from <http://eprints.aston.ac.uk/24203/>
- Roskies, A. L. (2007). Are Neuroimages Like Photographs of the Brain? *Philosophy of Science*, 74(5), 860–872. <http://doi.org/10.1086/525627>
- Saxe, R., Brett, M., & Kanwisher, N. (2006). Divide and conquer: a defense of functional localizers. *NeuroImage*, 30(4), 1088–1096; discussion 1097–1099. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.12.062>
- Skarda, C. A., & Freeman, W. J. (1987). How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behavioral and Brain Sciences*, 10(02), 161–173. <http://doi.org/10.1017/S0140525X00047336>
- Sporns, O. (2011). *Networks of the Brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Sternberg, S. (2011). Modular processes in mind and brain. *Cognitive Neuropsychology*, 28(3-4), 156–208. <http://doi.org/10.1080/02643294.2011.557231>
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Westview Press.
- Tagliazucchi, E., Balenzuela, P., Fraiman, D., & Chialvo, D. R. (2012). Criticality in Large-Scale Brain fMRI Dynamics Unveiled by a Novel Point Process Analysis. *Frontiers in Physiology*, 3. <http://doi.org/10.3389/fphys.2012.00015>
- Thompson, E., & Varela, F. J. (2001). Radical embodiment: neural dynamics and consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(10), 418–425.
- Tressoldi, P. E., Sella, F., Coltheart, M., & Umiltà, C. (2012). Using functional neuroimaging to test theories of cognition: a selective survey of studies from 2007 to 2011 as a contribution to the Decade of

- the Mind Initiative. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 48(9), 1247–1250. <http://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.05.024>
- Uttal, W. R. (2003). *The New Phrenology: The Limits of Localizing Cognitive Processes in the Brain*. MIT Press.
- Venturelli, N. (2010). El enfoque dinamicista en las neurociencias cognitivas: Un abordaje histórico a partir del concepto de metaestabilidad. En *Epistemología e Historia de la Ciencia*, vol. 16. P. García & Massolo, A. (Eds.) (pp. 664-672). Córdoba: Imprenta de la Facultad de Filosofía y Humanidades (UNC).
- (2015). Consideraciones epistemológicas alrededor del enfoque dinamicista en las neurociencias cognitivas. *Ciências & Cognição*, 20(1): 18-28.
- Von der Malsburg, C. von von der, Phillips, W. A., & Singer, W. (Eds.) (2010). *Dynamic Coordination in the Brain: From Neurons to Mind*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Wright, J. J., & Liley, D. T. J. (1996). Dynamics of the brain at global and microscopic scales: Neural networks and the EEG. *Behavioral and Brain Sciences*, 19(02), 285–295. <http://doi.org/10.1017/S0140525X00042679>
- Yarkoni, T. (2009). Big Correlations in Little Studies: Inflated fMRI Correlations Reflect Low Statistical Power—Commentary on Vul *et al.* (2009). *Perspectives on Psychological Science*, 4(3), 294–298. <http://doi.org/10.1111/j.1745-6924.2009.01127.x>
- Yarkoni, T., & Braver, T. S. (2010). Cognitive neuroscience approaches to individual differences in working memory and executive control: conceptual and methodological issues. In *Handbook of individual differences in cognition* (pp. 87–107). Springer New York. Retrieved from http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-1210-7_6
- Yarkoni, T., Poldrack, R. A., Van Essen, D. C., & Wager, T. D. (2010). Cognitive neuroscience 2.0: building a cumulative science of human brain function. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(11), 489–496. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2010.08.004>
- Yarkoni, T., Poldrack, R. A., Nichols, T. E., Van Essen, D. C., & Wager, T. D. (2011). Large-scale automated synthesis of human functional neuroimaging data. *Nature Methods*, 8(8), 665–670. <http://doi.org/10.1038/nmeth.1635>
- Yuste, R. (2015). From the neuron doctrine to neural networks. *Nature Reviews. Neuroscience*, 16(8), 487–497. <http://doi.org/10.1038/nrn3962>