

Aportación de las investigaciones con neuroimagen funcional a los estudios lingüísticos: algunas preguntas y respuestas

Victoria Marrero-Aguar
UNED
vmarrero@flog.uned.es

Resumen

El objetivo principal de este artículo, de carácter meramente introductorio, es mostrar el interés lingüístico de resultados obtenidos mediante las principales técnicas de neuroimagen funcional aplicadas al estudio del lenguaje, y los retos asociados al encuentro interdisciplinar entre la Lingüística y la Neurociencia. Comenzamos resumiendo los principios básicos de funcionamiento de las dos metodologías más utilizadas actualmente para estudiar la actividad del cerebro mientras realiza tareas lingüísticas: la de base electromagnética y la de base metabólica. A continuación, propondremos ejemplos de preguntas relevantes para la Lingüística que pueden encontrar respuestas en datos obtenidos mediante técnicas de neuroimagen. Concluiremos reflexionando sobre los distintos niveles de implicación de los lingüistas en el uso y avance de las técnicas de neuroimagen.

Palabras clave: Neurolingüística, Biolingüística, técnicas de neuroimagen funcional, procesamiento cerebral del lenguaje.

Abstract

The main objective of this article, of a merely introductory nature, is to show the linguistic interest of the results obtained by means of the main functional neuroimaging techniques applied to the study of language, and the challenges associated with the interdisciplinary encounter between Linguistics and Neuroscience. We begin by summarising the basic principles of the two most widely used methodologies to study the functioning of the brain while performing linguistic tasks: the electromagnetic-based and the metabolic-based techniques. We will then propose examples of questions relevant to linguistics that can be answered by data obtained using neuroimaging techniques. We will conclude by reflecting on the different levels of involvement of linguists in the use and progress of neuroimaging techniques.

Key words: Neurolinguistics, Biolinguistics, functional neuroimaging techniques, brain language processing.

1. Introducción

La historia de las relaciones entre Lingüística y Neurociencia empieza en abril de 1861, en una mesa de autopsias. Pocos días antes había fallecido monsieur Leborgne, un hombre de 51 años que perdió el habla a los 30, tras una lesión en mitad del lóbulo frontal del hemisferio izquierdo, y que vivió las dos décadas siguientes sin emitir más que la sílaba /tan¹. Cuando su cerebro fue presentado por el padre de la Neurociencia, Paul Broca, ante

la Societé d'Antropologie de París (fundada por él mismo, Giménez-Roldán 2017), comenzó una larga y fructífera línea de investigación sobre las bases neuroanatómicas de la capacidad humana del lenguaje.

Pero tuvieron que pasar casi 70 años antes de que las investigaciones pudieran realizarse con personas vivas y, por tanto, capaces de hablar mientras estaban siendo estudiadas. Fue en abril de 1929 cuando Hans Berger publicó el resultado de unos registros que habían comenzado cinco años antes, colocando un osciloscopio de dos canales sobre la piel que cubría una trepanación craneal en un joven de 17 años (La Vaque, 1999): entonces comenzó la electroencefalografía (EEG) como técnica de estudio del cerebro vivo. Cincuenta años más tarde, en 1975, se presenta la Tomografía por Emisión de Positrones (PET, por sus siglas en inglés), y en 1979 se graban las primeras imágenes por resonancia magnética. Ya en la década de los 90 se multiplican las opciones, al sumarse las imágenes obtenidas por resonancia magnética funcional (fMRI)² y mediante técnicas ópticas³. Desde hace casi un siglo, por lo tanto, el estudio de la actividad cerebral en humanos vivos se ha convertido en una de las áreas más productivas de la ciencia. Actualmente contamos con métodos y técnicas no invasivas que permiten observar la respuesta neuronal ante tareas de todo tipo, y entre ellas, la actividad lingüística ocupa un lugar destacado, tanto en su dimensión oral como lectoescrita. Como botón de muestra de ese interés creciente entre las relaciones del lenguaje con las técnicas de neuroimagen, las referencias que arroja la búsqueda de los términos “language AND neuroimaging” en la base de datos PsycINFO se ha multiplicado por más de 100 en las tres últimas décadas: de 13 publicaciones en el quinquenio 1988-1992 pasamos a 1413 entre 2013 y 2018. Los resultados de la búsqueda en la base de datos Scopus de “Language” y “Neuroimaging” en el título, el resumen o las palabras clave de los trabajos se recogen en la Figura 1.

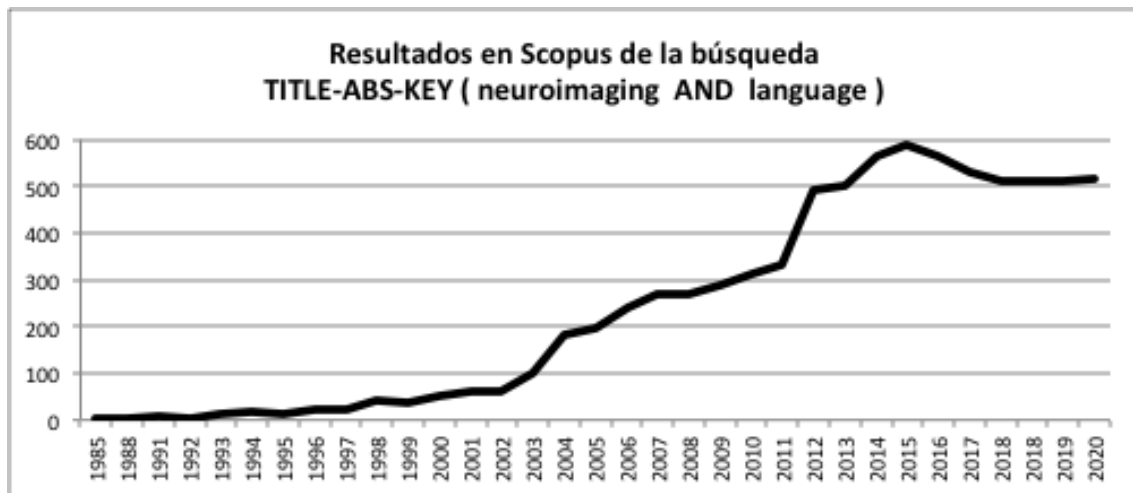


Figura 1. Resultados en la base de datos Scopus de las palabras clave “neuroimaging and language” cuando aparecen en el título, el resumen o las palabras clave del trabajo. En el eje horizontal se muestran los años de publicación y en el vertical, el número de publicaciones

En definitiva, el lenguaje, como actividad humana por excelencia, es uno de los objetos de estudio más relevantes para la Neurociencia cognitiva actual; los resultados que nos proporcionan las técnicas de neuroimagen, aunque generalmente se enmarcan en experimentos no diseñados por lingüistas, arrojan datos de gran interés para la Lingüística, y son objeto de mejora y revisión constantes, así como un buen punto de partida para un análisis crítico de las antiguas certezas (por ejemplo, Tremblay y Dick

2016). No solo la Neurolingüística, sino también la Biolingüística o la Psicolingüística, disciplinas cercanas en el ámbito cognitivo, llevan décadas haciendo un uso pleno de estas técnicas, y contribuyendo a su desarrollo (Paredes Duarte y Varo Varo 2006). Incluso áreas cuyo foco no es el lenguaje como capacidad cognitiva, sino la relación entre lengua y sociedad, como la etnolingüística o la sociolingüística, también están creciendo en su intersección con la Neurociencia⁴. En la próxima sección analizaremos cómo los niveles de análisis del lenguaje en torno a los cuales se estructuran las áreas centrales de nuestra disciplina (la fonología, la gramática, la semántica, la teoría lingüística...) también pueden encontrar nuevas respuestas a sus interrogantes clásicos en los estudios con técnicas de neuroimagen.

2. Principales técnicas para el estudio del cerebro ante el lenguaje

Esta sección pretende facilitar un primer acercamiento a la lectura crítica de la bibliografía procedente de estudios con técnicas de neuroimagen. Para complementar esta sección con recursos audiovisuales, recomendamos la charla TED2014 de Nancy Kanwisher *A neural portrait of the human mind*, en la que se muestran numerosas imágenes que pueden facilitar la comprensión de algunos aspectos técnicos.

Este apartado está estructurado cronológicamente: comenzaremos con las técnicas de base electromagnética, que son las más antiguas (pero siguen plenamente vigentes) y finalizaremos con las de base metabólica, entre las que se encuentran los últimos desarrollos aplicados al estudio del lenguaje y demás procesos cognitivos.

2.1. Técnicas de base electromagnética

La actividad de las neuronas es eléctrica por naturaleza. Las técnicas de base electromagnética miden de forma directa esa actividad eléctrica o el campo magnético asociado a la misma. Comenzaremos por las que detectan la electricidad, que proporcionan datos interesantes sobre el procesamiento del lenguaje a lo largo del tiempo con precisión de milisegundos, pero no permiten apreciar qué áreas se han activado para ello; terminaremos con la que detecta el campo magnético, que sí permite identificar grandes áreas del cerebro activadas, manteniendo al tiempo una resolución temporal muy buena.

El **electroencefalograma (EEG)** permite registrar, gracias a unos electrodos inocuos que se adhieren al cuero cabelludo, las ondas cerebrales que atraviesan el cráneo, resultado de la actividad conjunta de la corteza (o de un hemisferio, generalmente) en frecuencias que van desde unos 2 - 4 Hz en las ondas delta hasta más de 30 Hz en las gamma, pasando por las theta, alfa y beta. En los últimos años el estudio de estas ondas (estructurado en lo que se conoce como la perspectiva oscilómica) ha desarrollado propuestas muy interesantes sobre sus relaciones con el procesamiento del lenguaje: la banda delta estaría sincronizada con la información prosódica, la banda theta con la silábica y la banda gamma con la fonológica, y los acoplamientos en fase de las bandas delta y theta estarían relacionados con el procesamiento semántico y sintáctico (Murphy 2018). Puede verse una revisión excelente sobre esta perspectiva en Benítez-Burraco y Murphy (2019), y profundizar en Murphy (2020).

Por otra parte, son innumerables los trabajos realizados midiendo el comportamiento de unas ondas eléctricas concretas en el momento en que se presentan los estímulos lingüísticos: se trata de los potenciales evocados, y más concretamente los relacionados con eventos, ERP, (*Event Related Potentials*). Algunos de estos picos de energía son el N400, que se relaciona con la integración semántica; el P600, que al igual que el LAN (*left anterior negativity*) y el ELAN (*early left anterior negativity*), aparece ante errores, ambigüedades o incoherencias sintácticos, y el MMN (*mismatch negativity*), que se da cuando se nos presenta un estímulo auditivo diferente de los anteriores. Puede verse una revisión sobre el papel de los ERP en estudios lingüísticos en Beres (2017)⁵. Por último, mencionaremos brevemente la estimulación directa transcraneal (tDCs), una técnica se emplea con frecuencia en el tratamiento logopédico de la afasia, o en la depresión y otros trastornos psiquiátricos (respectivos metaanálisis en Corrales-Quispircra et al. 2020; Palm et al. 2016; Kekic et al. 2016); con población sana se ha utilizado en tareas lingüísticas de denominación, fluidez verbal, lectura, etc. (pueden consultarse más detalles en la revisión de Monti et al. 2013), aunque desde hace unos años su efectividad se ha puesto en duda (Westwood 2017).

No entraremos en más detalles sobre estos instrumentos por dos razones: la primera es que este monográfico cuenta con un artículo completo dedicado a la EEG y, en concreto, a los ERPs (véase Haro 2022); la segunda es porque no son, en realidad, técnicas de neuroimagen, ya que no permiten deducir qué áreas del cerebro son las que se han activado. Pese a ello, la EEG es el sistema más antiguo y posiblemente el más utilizado en Neurolingüística, así como el más accesible económicamente y el que se instala más fácilmente. Además, lo que pierde en resolución espacial lo compensa en resolución temporal, puesto que detecta los cambios en los potenciales con una sensibilidad de milésimas de segundo.

A diferencia de la EEG, la **electrocorticografía (EcoG)** capta mejor las ondas eléctricas neuronales y permite asignar la actividad a zonas concretas del cerebro porque suprime la barrera del cráneo, al colocarse los electrodos directamente en la corteza cerebral. Esta herramienta, unida a una interfaz computacional (*Brain-Computer Interface, BCI system*) que se ha desarrollado muy recientemente (el primer caso fue presentado por Vansteensel et al. en 2016), permite transformar la actividad registrada en habla, convirtiendo en fonemas ciertos patrones de actividad en la superficie cortical (Ramsey et al. 2018). Sin embargo, para utilizarla es necesaria una trepanación craneal, una intervención quirúrgica muy invasiva que hace este método útil solo para personas cuya patología lo justifique.

La **magnetoencefalografía (MEG)**, por su parte, registra los campos magnéticos que acompañan a la actividad eléctrica de las neuronas, tras su paso por el cráneo y el cuero cabelludo. A esas medidas directas se les aplican procedimientos de reconstrucción de la fuente que permiten una representación anatómica de las áreas de la corteza que se han activado, de modo que sí forma parte de las técnicas de neuroimagen clásicas, aunque su resolución espacial es discreta. La ventaja de los campos magnéticos, frente a la actividad eléctrica, es que no sufre distorsiones al atravesar los tejidos biológicos, pero su principal limitación es la bajísima intensidad del campo magnético del cerebro, de 10^8 o 10^9 menor que la del campo magnético terrestre o la de un frigorífico casero. De hecho, solo las dendritas apicales de las células piramidales consiguen ser registradas por los numerosos sensores del casco de un magnetoencefalógrafo. Aunque este aparato es mucho más costoso que el EEG (en todos los sentidos, económico, tecnológico y por dificultad de uso) y requiere que el participante guarde una inmovilidad casi absoluta (hasta un

pestañeo puede generar interferencias), ofrece una excelente resolución temporal, y cierta información espacial. Por ello se ha convertido en otra de las habituales fuentes de información para estudios sobre el lenguaje, como muestra la revisión de Frye et al. (2009) o la más reciente de Dikker et al. (2020).

Por último, la **estimulación magnética transcraneal (TMS)** también emplea el electromagnetismo para investigar el cerebro. No obstante, esta técnica no se limita a recoger los cambios en la actividad de las neuronas tras la presentación de un estímulo, sino que genera pulsos magnéticos que se aplican sobre la cabeza del participante, lo cual desencadena una breve corriente eléctrica en la superficie de la corteza capaz de despolarizar la población de neuronas cercanas. La TMS se utiliza especialmente para comprobar, antes de intervenciones quirúrgicas indicadas en epilepsias graves o en tumores cerebrales, las repercusiones funcionales (lingüísticas o de otro tipo) del área que se va a someter a cirugía. Puede verse una revisión sobre su uso en estudios lingüísticos en Miniussi et al. (2010).

2.2. Técnicas de base metabólica

La otra posibilidad para descubrir qué zonas del cerebro se activan en el momento de realizar una determinada tarea es averiguar dónde es mayor el consumo metabólico. En este caso, se trata de medidas indirectas basadas en la premisa de que la actividad neuronal desencadenada por los procesos cognitivos incrementa el consumo de oxígeno y glucosa en las zonas activas del cerebro (es lo que se conoce como *acoplamiento neurovascular*). Los cambios en el nivel de oxígeno en sangre provocan variaciones en el magnetismo de la hemoglobina que son captadas en una resonancia magnética; y también diferencias en la absorción o reflexión de rayos de luz infrarroja, detectadas a su vez por los métodos ópticos. Por otra parte, para observar el consumo de glucosa es necesario inyectar al sujeto un *trazador*, esto es, una sustancia radiactiva capaz de visibilizar esa actividad, como se detallará a continuación. Todas estas técnicas ofrecen una buena resolución espacial, pero peor resolución temporal que las derivadas de la actividad eléctrica, ya que dependen de procesos metabólicos desencadenados tras la activación neuronal.

La primera gran técnica tradicional entre las de base metabólica es la ya mencionada **tomografía por emisión de positrones (PET)**. Requiere que el sujeto ingiera, inhale o se inyecte un trazador radiactivo, cuya función es unirse a la glucosa para hacerla detectable (en concreto, aporta los positrones que se aniquilarán al entrar en contacto con los electrones de la corteza cerebral, generando los fotones que capta el tomógrafo, la máquina que permite obtener las PET). Aunque los trazadores tienen una vida muy corta⁶, no dejan de presentar cierto carácter invasivo; además, para ser producidos requieren un acelerador de partículas (un ciclotrón), lo cual, unido al escáner, encarece enormemente la instalación. A pesar de ello, se ha utilizado en estudios lingüísticos muy variados y, aprovechando que es silencioso, especialmente en el ámbito auditivo, en relación con la percepción de los sonidos del habla y el procesamiento fonológico (Johnsrude et al. 2002). Para una presentación general de las investigaciones sobre el lenguaje que utilizan esta técnica puede leerse el capítulo de Horwitz y Wise (2008) en el *Handbook of the Neuroscience of Language*.

Sin embargo, la técnica estrella en neuroimagen del lenguaje es, posiblemente, la imagen por **resonancia magnética funcional (fMRI)**⁷. Para obtener representaciones gráficas utilizando el fMRI es necesario, en primer lugar, generar mediante grandes imanes un

potentísimo campo magnético⁸ capaz de polarizar los átomos de hidrógeno del cuerpo (y del cerebro). Además, se necesita un sistema de radiofrecuencia para enviar una onda de radio (128 MHz para 3T) que los desestabilice. La máquina detecta el momento en que estos átomos vuelven a alinearse con el campo magnético (el proceso es un poco complicado, pero Armony et al. 2012 lo explican de forma muy accesible). En el ámbito médico, y con fines diagnósticos, se utiliza generalmente la resonancia magnética estática; aunque la que nos interesa a los lingüistas es la calificada como *funcional*, porque se registra mientras el sujeto realiza alguna tarea, y mide las diferencias magnéticas entre la sangre oxigenada empleada por las neuronas activas y la desoxigenada de las inactivas. Una de las principales limitaciones de la fMRI es que la máquina genera un ruido tremendo (de al menos 90-110 Hz), que hace imprescindible la protección auditiva y dificulta la presentación de estímulos sonoros. Aunque se están haciendo muchos esfuerzos para solventar esta limitación (Ljungberg et al. 2021), y desde hace años se han publicado trabajos con los estímulos presentados auditivamente (por ejemplo, Holmes et al. 2021), lo cierto es que en la bibliografía sobre procesamiento lingüístico predominan las tareas que requieren lectura (sobre cuyas implicaciones volveremos en las conclusiones).

La resonancia magnética también está en la base de unas técnicas que permiten visibilizar no ya la actividad neuronal, sino la de la sustancia blanca del cerebro, la que compone las fibras mielinizadas de los axones que conectan las neuronas. Se pueden obtener así representaciones de las conexiones neuronales, de las redes que unen diferentes áreas del cerebro: son las imágenes de **resonancia magnética por difusión (dMRI)** y las **imágenes con tensor de difusión (DTI)**, que constituyen las técnicas de **tractografía**. Tanto la dMRI como la DTI captan la disposición de los protones del agua en el cerebro. Los axones de las neuronas están recubiertos por una capa aislante, la mielina, que limita las posibilidades de difusión del agua en su interior, y por tanto influye en el alineamiento de esos protones. Los cambios de dirección en los protones son detectados por el escáner, y tras aplicar una compleja computación acaban representándose como líneas de colores. La tractografía está en la base del *Human Connectome Project*, un gran reto internacional en Neurociencia, abordado entre 2009 y 2014, cuyo objetivo fue crear y compartir la “matriz de conexiones” del cerebro humano. Desde 2015 el proyecto, que se puede consultar en la web <https://www.humanconnectome.org>, ha continuado creciendo en dos áreas: el *conectoma a lo largo de la vida (lifespan connectome)* con datos de casi cinco mil sujetos sanos de todas las edades, y los *conectomas relacionados con la enfermedad humana* (Alzheimer, demencia, psicosis, epilepsia, pérdida de visión, etc.). Uno de sus resultados es el *conectoma del lenguaje* (Dick et al. 2014; Vassal et al. 2016; Przeździk et al. 2019), que se resume en esta cita:

El lenguaje se procesa en un sistema cortical y subcortical distribuido. Aunque es importante identificar las regiones cerebrales que forman parte de este sistema, es igualmente importante establecer la conectividad anatómica que sustenta sus interacciones funcionales. El marco más prometedor es aquel en el que el lenguaje se procesa a través de dos “corrientes” que interactúan —una corriente dorsal y otra ventral— ancladas mediante largas vías de fibras de asociación (Dick et al. 2014: 455; esta traducción y todas las que siguen son propias).

El conectoma del lenguaje se ha relacionado con el procesamiento en personas bilingües (Mitsuhashi et al. 2020), otra de las áreas de aplicación de las técnicas tractográficas

(Mohades et al. 2012; García-Pentón et al. 2014 con hablantes de español y euskera; Hämäläinen et al. 2017; Pliatsikas et al. 2020; etc.)

El último grupo de técnicas de neuroimagen funcional basadas en los cambios metabólicos tiene una base óptica: son la **espectroscopía funcional del infrarrojo cercano (fNIRS)** y la **tomografía óptica difusa de alta densidad (HD-DOT)**. Ambas miden las variaciones en la absorción o reflexión de rayos de luz infrarroja producidas por los cambios en el nivel de oxígeno en la sangre. En sus revisiones sobre las aplicaciones de estas técnicas a los estudios lingüísticos, tanto Peelle (2017) como Quaresima et al. (2012) o Scherer et al. (2009, en español) destacan sus principales ventajas: aunque no sobresalgan ni por su resolución espacial (mejor en HD-DOT que en fNIRS) ni por la temporal, son equipamientos relativamente asequibles, silenciosos y con cierto grado de portabilidad que permite a los participantes algún movimiento mientras realizan la tarea e, incluso, la interacción con otras personas. Por eso se han utilizado para investigar el desarrollo del lenguaje en bebés y niños, en poblaciones que no pueden ser sometidas a imágenes por resonancia magnética, como los implantados cocleares, y en estudios de comprensión de habla sin interferencias de ruido.

En suma, cada técnica tiene sus ventajas y sus inconvenientes, y es bastante frecuente el uso combinado de algunas de ellas. Así, encontramos centenares de trabajos en cuyo título aparecen simultáneamente la MEG y el EEG, y en manuales como el de Hari y Puce (2017) se explica su uso conjunto. No pocos añaden además la fMRI (entre otros, Wang et al. 2021), cuya combinación con la PET es también bastante habitual (Sekiyama et al. 2003, por ejemplo). Horwitz y Poeppel (2002) proponen incluso la utilización conjunta de estas cuatro técnicas. Entre las de tipo óptico, las combinaciones más frecuentes son las de fNIRS y fMRI (como muestra, Yuan y Ye 2013). La finalidad es aprovechar los puntos fuertes de cada una. En la Figura 2 (adaptada de Lizarazu 2017) se comparan la resolución temporal y espacial de cinco de estos métodos: los de base eléctrica comparten su excelente comportamiento en el eje del tiempo, con diferencias en el del espacio (peor el EEG, regular la MEG y buena la EcoG); las de base metabólica tienen todas peor resolución temporal (la peor, la PET, seguida por la fMRI, y la NIRS), pero mejor resolución espacial (especialmente las dos primeras). Por último, la Figura 3 (de elaboración propia y, en cierta medida, subjetiva) compara gráficamente el coste económico de cada equipamiento (calculado *grosso modo*) y el nivel de invasividad o incomodidad (ruido, inmovilidad...) que provoca en los participantes: en un solo vistazo es fácil apreciar las ventajas de la fNIRS o las metodologías basadas en el EEG.

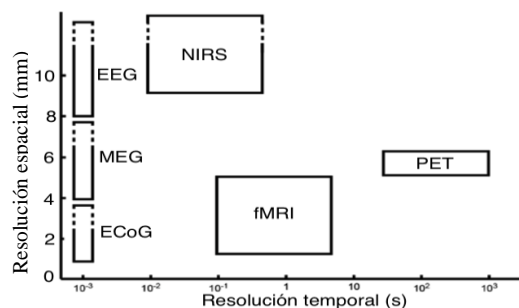


Figura 2. Resolución espacial y temporal de diferentes técnicas de neuroimagen. Adaptado de Lizarazu (2017, Figura 9)

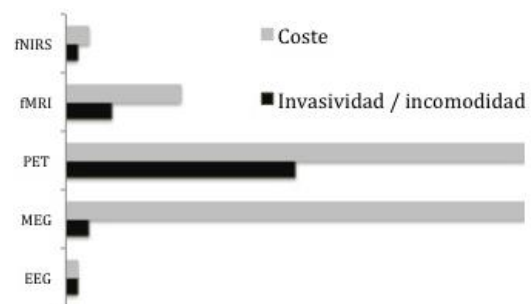


Figura 3. Coste relativo aproximado y nivel de invasividad o incomodidad de diferentes técnicas de neuroimagen

3. ¿Qué preguntas relevantes para la Lingüística pueden tener respuesta en estudios con neuroimagen? Algunos botones de muestra

Tras la somera presentación de las técnicas de neuroimagen utilizadas en la actualidad para el estudio de la cognición humana en general, y el lenguaje en particular, en este apartado ejemplificaremos con algunas preguntas concretas de investigación qué cuestiones lingüísticas pueden recibir nueva luz a partir de los datos proporcionados por estos instrumentos. Por lo tanto, presentaremos unos pocos ejemplos que solo pretenden poner de manifiesto qué tipo de evidencias nos pueden proporcionar los estudios con neuroimagen en relación a objetos de estudio habituales en Lingüística.

Utilizaremos aquí una progresión clásica: comenzaremos en el nivel fónico, luego abordaremos el morfológico, el sintáctico y terminaremos con el semántico. Todo ello sin la menor pretensión de exhaustividad; para conocer en mayor profundidad las bases neuroanatomofisiológicas del procesamiento lingüístico remitimos, en español, a Benítez-Burraco (2006), o, para una perspectiva estrictamente médica, a González y Hornauer-Hughes (2014).

3.1. En el nivel fónico: ¿cómo pasamos de la fonética a la fonología? ¿Podemos definir los fonemas solo con rasgos acústicos, o son imprescindibles también los rasgos articulatorios?

¿En qué momento y de qué manera conseguimos que la onda sonora que llega a nuestro oído se convierta en una sucesión de fonemas, unidades discretas y abstractas, con capacidad para generar pares mínimos en las lenguas? Encontramos esta pregunta al menos desde los inicios de la Lingüística moderna. En el *Cours de linguistique générale* de Ferdinand de Saussure se alude a una distinción entre la sensación acústica y su representación mental: el sonido solo se incorpora a la estructura lingüística cuando se ha transformado en un elemento psíquico, la imagen verbal (Saussure 1916: 28-29).

La respuesta que nos ofrece la neuroimagen funcional permite una reflexión abstracta sobre la existencia del fonema como unidad lingüística (Rampinini y Ricciardi 2017), pero también descubrir dónde tiene lugar esa mutación de señal continua en elementos discretos: en la corteza auditiva primaria (*primary auditive cortex* o PAC, correspondiente a las áreas de Broadman 41 y 42), que en humanos diestros suele estar más desarrollada en el hemisferio izquierdo, aunque en los primates es simétrica en ambos hemisferios. Y lo que es más interesante, permite mostrar cómo se produce esta mutación: gracias a la organización tonotópica de esa zona del cerebro, también presente en la cóclea y en las vías auditivas. Las neuronas en la PAC están especializadas para responder a determinadas frecuencias de los sonidos, se distribuyen en un mapa ordenado, desde los tonos más bajos, en un extremo, a los más altos, en el extremo contrario, y se comportan de forma distinta en el hemisferio izquierdo que en el derecho.

[la secuencia de] tonos de altos a bajos se organiza de manera medial a lateral y rostral a posterior en ambas PAC. La PAC izquierda parece ser más sensible a los tonos entre 500 y 4000 Hz que la derecha; la derecha es, en general, más sensible a las frecuencias más altas [...]. Cabe destacar que los fonemas, los sonidos del lenguaje, se encuentran principalmente en el rango de frecuencias de 500 a 4000 Hz (Bernal y Ardila 2016: 458).

La corteza auditiva primaria del hemisferio izquierdo, especializada en los sonidos del habla, tiene capacidad para inhibir la señal procedente del hemisferio derecho y además recibe información directa de la corteza visual, permitiendo una decodificación multimodal de la señal: “para la percepción categorial de los fonemas, tanto auditiva como visualmente, la PAC está fuertemente lateralizada en el lóbulo temporal izquierdo” (Bernal y Ardila 2016: 459). La naturaleza intrínseca del fonema, pues, sería no solo auditiva sino multimodal.

La segunda pregunta que planteamos en este epígrafe, esto es, cuál es el papel de los procesos articulatorios en la definición de los fonemas, se remonta igualmente a las propuestas del maestro ginebrino: “no podemos, pues, reducir la lengua al sonido ni separar el sonido de la articulación bucal” (Saussure 1916: 24). La Lingüística posterior continuó considerando la cuestión en infinidad de ocasiones, desde la primera fonología generativista, cuando Chomsky y Halle (1968) incorporan rasgos distintivos de naturaleza articulatoria a los puramente acústicos de Jakobson et al. (1952), hasta la Teoría Motora de la percepción del habla, cuya primera hipótesis es que los objetos de la percepción del habla no son los sonidos, sino los gestos articulatorios necesarios para generarlos (Lieberman y Mattingly 1985; Galantucci et al. 2006). El descubrimiento de las neuronas espejo, que se activan no solo para ejecutar ciertas acciones, sino también cuando se ven o se oyen esas acciones ejecutadas por otros (Rizzolatti et al. 1996) se relacionó desde muy pronto con la Teoría Motora. En este sentido, varios estudios con técnicas de neuroimagen han mostrado que las áreas motoras del cerebro necesarias para la producción de los sonidos están activas durante la percepción del habla (Watkins et al. 2003; Wilson et al. 2004; Wilson y Iacoboni 2006) o que su estimulación interfiere con la decodificación del mensaje, especialmente en condiciones difíciles, como en presencia de ruido o distorsiones (Rogers et al. 2014; Schomers y Pulvermüller 2016; Nuttall et al. 2018). Sin embargo, también encontramos evidencias en sentido contrario: personas con lesiones en las áreas atribuidas a las neuronas espejo no tienen problemas en la percepción del habla (Rogalski et al. 2011; Stasenکو et al. 2013). En definitiva, la cuestión sigue abierta, tanto en Lingüística como en Neurociencia, y ambas áreas se enriquecen la una a la otra con sus respectivos avances.

No podemos extendernos más en el nivel fónico, pero los estudios con técnicas de neuroimagen también han arrojado luz sobre otras muchas cuestiones, algunas de alcance geolectal, como el procesamiento de diferentes variedades de una lengua⁹, incluidas el castellano y el español de América (Hernández et al. 2019). En este último trabajo se detecta que las actitudes lingüísticas (la diferencia entre la valoración de la variedad geolectal propia frente a la variedad ajena) tienen correlatos neuronales: así, los centros de recompensa en el tálamo y el centro estriado estarían más activos ante el estímulo correspondiente a la variedad propia, lo cual “presumiblemente revela el sentido de pertenencia social de las personas” (Hernández et al. 2019: 12). También se han investigado las diferencias entre la prosodia lingüística y la emocional (puede leerse un metaanálisis de 29 trabajos en Belyk y Brown 2014), e, incluso la asociación de algunos sonidos con determinados rasgos semánticos (por ejemplo, la secuencia /fl/ con ‘fluido’ en Mompeán et al. 2020): el fonosimbolismo (Kanero et al. 2014; Revill et al. 2014).

3.2. En el nivel morfológico: ¿nos cuesta lo mismo asignar el género a la palabra fuente que a carro? ¿Procesamos igual el género que el número?

La mayor riqueza morfológica de las lenguas romances respecto al inglés ha permitido que este nivel de análisis en español haya recibido una cierta atención en Neurociencia:

La investigación neurolingüística sobre las lenguas romances, principalmente el francés, el italiano y el español, ha resultado clave para el progreso de esta área, especialmente con referencias específicas a cómo funciona la infraestructura neuronal del lenguaje en el caso de sistemas flexivos más ricos que el inglés. Entre los temas de investigación más habituales se encuentran los fenómenos de concordancia; los estudios sobre el español y el italiano demostraron que la concordancia entre diferentes morfemas [*across features and domains*] (por ejemplo, la concordancia de número o de género) involucra sustratos neuronales parcialmente diferentes (Bambini y Canal 2021: 1).

La primera pregunta que planteamos en este apartado tuvo respuesta en el estudio de Hernández et al. (2004), mediante un experimento con fMRI. En esta investigación se analizó la actividad neuronal de 9 hispanohablantes ante la tarea de decidir si 96 nombres eran masculinos o femeninos: la mitad eran opacos en cuanto al género, puesto que no terminaban ni en *-o* ni en *-a*. Las respuestas ante estos estímulos requirieron mayor activación y en más áreas que las de estímulos masculinos terminados en *-o* y femeninos en *-a*. Por lo tanto, si consideramos que una activación mayor y en más áreas se relaciona generalmente con una mayor carga cognitiva, la respuesta a nuestra pregunta sería negativa: nos costaría más decidir que la palabra *fuate* es femenino que marcar *carro* como masculino.

El resultado anterior no es sorprendente, probablemente habríamos apostado por ello. Pero la respuesta a la segunda pregunta, “¿procesamos igual el género que el número?”, quizá no resulte tan evidente: detectar los errores de concordancia en número requiere activar zonas del cerebro dedicadas al procesamiento de la cantidad, algo que no ocurre con el género (Carreiras et al. 2010). Además, un estudio con magnetoencefalografía permitió a Molinaro et al. (2013) descubrir que la diferencia de significado entre singular y plural (‘uno’ / ‘más de uno’) provocaba la aparición de un componente tardío que suele reflejar incrementos en la dificultad del procesamiento semántico. Así pues, la respuesta en este caso también parece ser negativa: los errores de concordancia en ambos morfemas se procesan de forma diferente y presentan distintos niveles de dificultad.

Otra área de la morfología que ha recibido notable atención en estudios con técnicas de neuroimagen es la diferencia entre verbos y nombres (que ya había llamado la atención de los afasiólogos mucho antes: Damasio y Tranel 1993). Posteriormente se han reinterpretado las diferencias de procesamiento encontradas entre ambas clases de palabras considerando las propiedades semánticas de los diferentes grupos de verbos. Por ejemplo, en el marco de la cognición corporeizada (Barsalou 2010, véanse más referencias en el próximo apartado), el estudio de los verbos de acción ha dado lugar a la hipótesis de que procesar conceptos asociados al movimiento provoca la activación de las áreas motoras frontales, las mismas que se pondrían en funcionamiento para generar ese movimiento. En una interesante revisión crítica, Vigliocco et al. (2011) llegan a esta conclusión:

Si consideramos la confusión que hay en la mayoría de los estudios entre las distinciones semánticas (objetos frente a acciones) y la distinción gramatical (sustantivos frente a verbos), y la confusión entre los estudios relacionados con los mecanismos de procesamiento de una sola palabra y los estudios relacionados con la integración de la oración, la imagen resultante es relativamente clara: se observa una clara separabilidad neuronal entre el procesamiento de las palabras

de objeto (sustantivos) y las palabras de acción (típicamente verbos); los efectos de la categoría gramatical aparecen o se hacen más fuertes cuando las tareas y las lenguas imponen mayores demandas de procesamiento (Vigliocco et al. 2011: 407).

Concluimos esta breve presentación de las respuestas que nos ofrecen las técnicas de neuroimagen sobre el nivel morfológico con el deseo que cierra la reflexión de Kemmerer (2014) sobre la intersección entre la Lingüística y la Neurociencia cognitiva, en el sentido de una mayor atención por parte de la Neurociencia a las aportaciones procedentes de la Lingüística (concretadas, en este caso, en la tipología): “A medida que pase el tiempo, los neurocientíficos cognitivos podrían empezar a interesarse más por dilucidar los fundamentos corticales de los tipos de categorías que suelen estudiar los tipólogos, que, al fin y al cabo, son las máximas autoridades en materia de diversidad entre lenguas” (Kemmerer 2014: 43).

3.3. En el nivel sintáctico: ¿las oraciones subordinadas de relativo de sujeto y las de objeto son similares cognitivamente? ¿Es más fácil procesar *Ana apareció o Ana cortó el pan?* ¿Y *Ana cortó el pan frente a Ana abrió la puerta?*

Desde comienzos del siglo XXI se han publicado diversas revisiones que relacionan la gramática generativa (Chomsky 1957, 1995) con los descubrimientos proporcionados por las técnicas de neuroimagen. Posiblemente el trabajo más conocido en esta línea es el de Friederici et al. (2017), con el propio Chomsky como segundo firmante, que fue precedido por Grodzinski y Friederici (2006), Ohta et al. (2013), o por la revisión crítica de Caplan (2001). Pero en esta sección nos plantearemos preguntas muy básicas e independientes de modelos teóricos. La primera es un tema estrella en Neurolingüística: la diferencia entre dos tipos de oraciones subordinadas, las de objeto y las de sujeto, que, según la gramática generativa, requieren diferentes operaciones de movimiento para ser interpretadas. Se han realizado al respecto decenas de experimentos con técnicas de neuroimagen; sobre el inglés, tanto con fMRI (Just et al. 1996; Cooke et al. 2002; Santi y Grodzinsky 2010), como con PET (Caplan et al. 2000 o Waters et al. 2003); sobre el hebreo con fMRI (Ben-Shachar, Hendler et al. 2003; Ben-Shachar, Palti et al. 2004); sobre el alemán, también con fMRI (Fiebach et al. 2005), entre otros muchos. La conclusión principal de todos ellos es que las subordinadas de objeto requieren más activación neuronal que las de sujeto. Sin embargo, estas técnicas son relativamente invasivas e incómodas (véase apartado 2), por lo que, en 2015, Hassanpour y sus colegas intentaron superar algunas de las carencias de la fMRI y la PET utilizando el HD-DOT. Presentaron a 10 jóvenes anglohablantes nativos unas frases con subordinadas de relativo de objeto y de sujeto cuyos agentes alternaban entre femeninos y masculinos (*los hombres que ayudan a las mujeres son útiles; las mujeres que ayudan a los hombres son útiles; los hombres a los que ayudan las mujeres son útiles; las mujeres a las que ayudan los hombres son útiles*). La tarea consistía en pulsar el botón izquierdo si la persona que realizaba la acción era mujer y el derecho si era hombre. Las tasas de acierto y el tiempo de respuesta fueron similares para los dos tipos de subordinadas. Pero, como mostraban también los experimentos con fMRI y PET, la actividad cortical no era la misma:

Durante la comprensión correcta de las subordinadas relativas de objeto, encontramos regiones cerebrales con una actividad significativamente más fuerte que se superponía a la red central de procesamiento del habla, así como regiones complementarias que no se observaban en respuesta a las oraciones más simples,

las relativas de sujeto. En general, la HD-DOT reveló una ampliación de la red de procesamiento del habla cuando aumentó la carga de procesamiento (Hassanpout et al. 2015: 323).

Por lo tanto, la respuesta a nuestra primera pregunta en este apartado vuelve a ser negativa: las oraciones subordinadas de relativo de sujeto y las de objeto se procesan de modo diferente.

Otro de los temas reiteradamente estudiados en la aplicación de técnicas de neuroimagen a cuestiones sintácticas y que nos servirá de enlace con el epígrafe 3.4, dedicado a la semántica, es si existe alguna diferencia en la activación neuronal ante verbos intransitivos (inergativos o inacusativos) y verbos transitivos o ditransitivos. En los ejemplos que encabezan este apartado encontramos un verbo intransitivo puro o inergativo, cuyo argumento tiene el papel de agente (*Ana apareció*) frente a un transitivo alternante (*Ana abrió la puerta*, que admite *la puerta se abrió*) y un transitivo no alternante (*Ana cortó el pan*, **el pan se cortó*). Es el tipo de estímulos utilizados en trabajos sobre el inglés como los de Thompson et al. (2007), den Ouden et al. (2009), Meltzer-Asscher, Schuchard et al. (2013) o Meltzer-Asscher, Mack et al. (2015). En este último se presentaron por escrito a 16 jóvenes y 13 personas mayores (54-70 años) setenta y dos verbos del inglés en infinitivo (18 inergativos o intransitivos puros, como *salivar*, que solo admiten un argumento; 18 inacusativos que solo se usan como intransitivos, como *aparecer*, cuya estructura argumental consta también de un solo elemento; 18 inacusativos que pueden usarse como transitivos, con dos argumentos, o como intransitivos, con uno: es el caso de *abrir*; y 18 transitivos, que presentan dos argumentos: *aceptar*) más 48 pseudoverbos. La tarea consistía en distinguir los verbos de los pseudoverbos mientras se tomaban imágenes de fMRI. Los resultados conductuales solo mostraron mayores tiempos de reacción en los verbos inacusativos no alternantes (*aparecer*). También la fMRI mostró que el incremento en el número de papeles temáticos provocaba activaciones en la zona posterior perisilviana del hemisferio izquierdo y que el procesamiento de estos verbos activaba un área diferente de los otros (el giro inferior frontal izquierdo), lo cual se interpreta como un reflejo de su dificultad cognitiva. En resumen, tal vez en contra de lo que hubiéramos podido suponer, este experimento nos permitiría responder que la estructura más difícil de las enunciadas más arriba es *Ana apareció*.

3.4. En el nivel semántico: ¿Se procesan igual las relaciones de semejanza que las de contigüidad? ¿Pueden los experimentos con neuroimagen aportar algo a lo que sabemos sobre la relación entre significado y referente?

En trabajos recientes sobre las bases neuronales del procesamiento semántico se afirma que la red neuronal que permite conocer los significados de las palabras es ya tan conocida, que lo único que sigue sujeto a debate es el modelo que mejor explica la función de cada una de sus partes:

Aunque la red de regiones cerebrales que sustentan la cognición semántica está bien establecida (Binder et al. 2009; Lambon Ralph et al. 2017), no está claro si las distinciones funcionales entre estos sitios reflejan diferencias en contenidos [*content*] o en procesos [*process*] (Mirman et al. (2017) en Teige et al. 2019: 308).

En el mismo sentido se pronuncia Varo Varo, que además reclama una mayor atención por parte de la Lingüística hacia esta fuente de información:

La Semántica léxica no puede desarrollarse a espaldas de los avances en neurociencia, que nos proporcionan evidencias empíricas abundantes sobre dónde, cuándo y cómo se procesa el significado de las palabras (Varo Varo 2017: 192).

Esa abundancia en las investigaciones ha permitido la publicación de bastantes meta-análisis que reutilizan los datos previos de experimentos con neuroimagen y obtienen conclusiones más generalizables: Joseph (2001), Bookheimer (2002), Thompson-Schill (2003), Damasio et al. (2004), Gerlach (2007), Binder et al. (2009), etc. En buena parte, los esfuerzos de los investigadores se han centrado en localizar de forma precisa las áreas del cerebro que se activan durante el procesamiento semántico. Para un lingüista, saber si el giro temporal anterior tiene más o menos activación que el lóbulo parietal inferior tiene solo un interés relativo. Pero seguramente sí le interesa saber es que, a diferencia de lo que ocurre con la sintaxis, o la fonología, recuperar el significado léxico requiere la participación de regiones diversas en la corteza cerebral, y no solo en las áreas atribuidas al procesamiento lingüístico; también otras, multimodales y asociativas, generalmente localizadas preferentemente en el hemisferio izquierdo, pero en un tercio de los experimentos, también en el derecho. La cita siguiente y su representación gráfica (Figura 4), procedentes de la revisión de Binder et al. (2009), pueden resumir la información que necesitamos.

Las regiones corticales implicadas en el procesamiento semántico pueden agruparse en tres grandes categorías: la corteza de asociación posterior multimodal y heteromodal, la corteza prefrontal heteromodal y las regiones límbicas mediales. La expansión de estas regiones en el cerebro humano, en comparación con el de los primates no humanos, explicaría capacidades exclusivamente humanas para utilizar el lenguaje de forma productiva, para planificar, para resolver problemas y crear artefactos culturales y tecnológicos, todo lo cual depende de una recuperación y manipulación fluidas y eficientes del conocimiento semántico (Binder et al. 2009: 2783-2784).

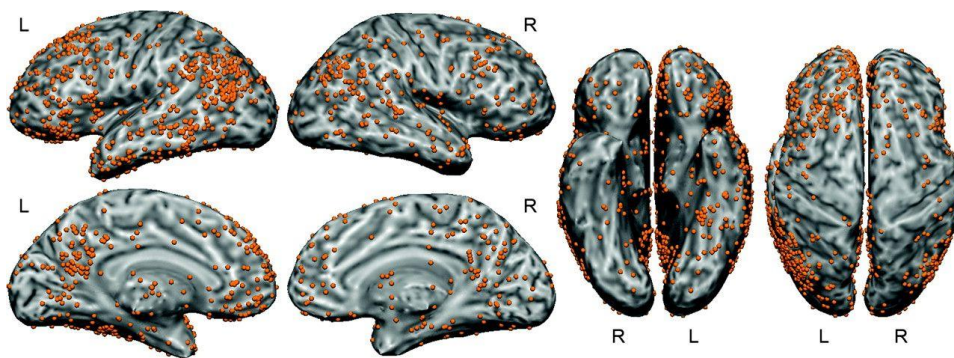


Figura 4. Binder et al. (2009: 2771). Proyección en una superficie cortical de los 1150 focos de activación publicados en los estudios revisados

Puede ser también relevante para la Lingüística saber qué rasgos semánticos tienen repercusiones neuronales, es decir, qué diferencias de significado provocan patrones de activación particulares. Y a este respecto, hay un contraste que ha sido estudiado muy concienzudamente en trabajos con neuroimagen: la diferencia entre relaciones de semejanza, basadas en características físicas compartidas (*perro-lobo*, *gato-topo*), y las

de contigüidad, basadas en coapariciones frecuentes (*perro-correa*, *topo-tierra*). Es el tipo de contraste que da pie a la tradicional diferencia entre metáforas y metonimias. Los resultados de múltiples experimentos han permitido la formulación de dos teorías para su explicación: la del *centro dual* (*dual hub*) postula que hay una zona especializada en procesar las relaciones de semejanza (los lóbulos temporales anteriores, ATL) y otra que se dedica a las de contigüidad (regiones temporoparietales, concretamente la circunvolución temporal media posterior, pMTG). En cambio, desde la teoría de *centro y radios* (*hub and spoke*) o la *Cognición Semántica Controlada* (CSC) se propone que ambas relaciones de significado se procesan en los ATL (el *centro*), pero que el papel del pMTG izquierdo, uno de los *radios*, sería recuperar esa información y, así, esta región estaría encargada del “control” semántico (una revisión en Lambon Ralph et al. 2017). En un trabajo con estimulación magnética transcraneal se puso de manifiesto la importancia de la frecuencia de uso de las palabras a este respecto: cuanto más infrecuente es la relación entre esas parejas (por ejemplo, *champagne-piscina*, frente a *champagne-fiesta*; o *dedo-guante*, frente a *dedo-garra*) mayor será la implicación de la zona radial, y más fuerte su relación con el centro, su ATL (Teige et al. 2019).

Otra fructífera línea de intersección entre la teoría semántica y la Neurolingüística, con las técnicas de neuroimagen como metodología, son las propuestas de la semántica corporeizada, ligada desde sus inicios a los circuitos cerebrales. Puede verse un rápido bosquejo en Varo Varo (2017: 1041-1042) desde las primeras formulaciones hasta otras más recientes, como la de Pulvermüller (2013)¹⁰. En la Universitat Jaume I de Castellón se ha llevado a cabo una línea de investigación en este marco, con preguntas como la siguiente: ¿qué ocurre cuando oímos o leemos palabras como *ajo*, *canela* o *vómito*? La respuesta es que se activan las áreas del cerebro necesarias para procesar los olores (González et al. 2006), como se activan las áreas gustativas cuando leemos *aceituna*, *sal* o *chorizo* (Barros-Loscertales et al. 2012). Del mismo modo, las palabras *besar*, *mascar* o *soplar* activan áreas motoras relacionadas con los músculos faciales, y *caminar* o *correr* las que dominan los músculos de las piernas (Hauk et al. 2004; Pulvermüller et al. 2005; Pulvermüller y Fadiga 2010). En un artículo divulgativo sobre los resultados de este grupo, González reflexiona sobre las repercusiones que estos descubrimientos tienen para la teoría del significado léxico:

Siempre hemos pensado en los significados como algo abstracto, amodal, desligado del terreno (*ground*) de las sensaciones y las acciones motoras. Pero lo que el cerebro nos indica es que incorpora y entreteje esta información de bajo nivel en la construcción de los elevados significados. Una información que en última instancia es corporal, tiene que ver con nuestras sensaciones y movimientos. Cuando aprendemos las palabras, además de los circuitos responsables de su forma fonológica y articulatoria, activamos en estrecha vecindad temporal otras áreas encargadas de la información sensorial y motora procedente de nuestras experiencias con el objeto referenciado (González Álvarez 2012: 129).

Los estudios sobre procesamiento lingüístico alcanzan también, aunque con menor frecuencia, los niveles textuales, discursivos y pragmáticos. No podemos extendernos en ello, pero remitimos a trabajos sobre el español, como los de Martín-Loeches et al. (2008) con fMRI, o el meta-análisis de Frestl et al. (2008).

4. Conclusiones

Las técnicas de neuroimagen están permitiendo un conocimiento cada vez más preciso de la actividad cerebral necesaria para utilizar el lenguaje, no solo en la corteza, sino también en el cerebelo, el tálamo o los ganglios basales, sin olvidar los circuitos que los conectan. Hemos pasado de una visión dicotómica, propia de la época en que las únicas evidencias procedían de cerebros lesionados, y limitada al lóbulo temporal del hemisferio izquierdo (cuya región anterior, el área motora o de Broca, estaría encargada de la producción del habla, y la posterior, el área auditiva o de Wernicke, de su descodificación) a propuestas más flexibles y complejas:

Los centros encargados del procesamiento lingüístico no son homogéneos, sino que se organizarían como una red difusa de subcentros, cada uno de los cuales sería responsable del procesamiento de componentes específicos del lenguaje. Consecuentemente, estos subcentros neuronales podrían describirse con mayor propiedad en términos de su especialización lingüística, de manera que aquellos componentes del lenguaje (fonología, semántica, sintaxis) contarían, en principio, con un correlato estructural y funcional en lo que atañe a la organización cerebral. Y lo que es aún más significativo: cada uno de estos procesos (lingüísticos) puede a su vez fraccionarse, en el sentido de que circuitos neuronales diferentes se encargarían de aspectos distintos de los mismos (Benítez-Burraco 2006: 462).

Desde sus primeras aplicaciones al estudio del procesamiento lingüístico, en los años 90, las técnicas de neuroimagen demostraron una precisión mucho mayor que la que permitían los datos de lesionados cerebrales, en los cuales además era imposible controlar los efectos de la plasticidad y reorganización cerebral. Ciertamente, tienen limitaciones: algunas derivan de las propias técnicas, por ejemplo, el acoplamiento neurovascular requiere medidas de normalización y un software especializado, en continua revisión crítica (Phillips et al. 2016); y este a su vez incorpora modelos matemáticos cuyas diferencias quizá no siempre se calibren de forma adecuada (Huneau et al. 2015). Otras están relacionadas con cuestiones metodológicas más generales, como el número de sujetos, las pruebas estadísticas o las validaciones independientes (véanse las recomendaciones de Poldrack et al. 2017).

Pese a ello, han dado lugar a “muchos hallazgos [que] han sido replicados una y otra vez hasta llevar a algunas conclusiones consistentes e indiscutibles” (Price 2012: 1053). Entre esas evidencias ya plenamente aceptadas, Price (en una revisión y síntesis personal, atípica pero enormemente interesante, de los experimentos con PET y fMRI publicados entre 1992 y 2011 para investigar la percepción y producción del lenguaje oral y la lectura) destaca la diferencia entre procesos que se localizan en estructuras específicas (por ejemplo, el procesamiento sensorial y motor) y los que surgen de un patrón de activación distribuido en áreas diferentes que participan en múltiples funciones. Por ejemplo, el procesamiento fonológico se localiza en regiones concretas, en la integración entre las áreas especializadas en procesamiento acústico (en regiones del lóbulo temporal) y las dedicadas al procesamiento articulatorio (en regiones premotoras y frontoparietales). En cambio, la semántica requiere la activación de muchas áreas en el hemisferio izquierdo, cuyos papeles aún no están suficientemente definidos.

Sin embargo, es importante destacar que la mayoría de esos esfuerzos se encaminan a lograr fines de interés clínico o neuropsicológico, no lingüístico. La localización precisa de áreas anatómicas en las que tiene lugar cada uno de los procesos y subprocesos

necesarios para usar el lenguaje es muy importante si el objetivo es el éxito en una operación de un tumor cerebral, pero determinar si para la interpretación de los significados es más importante el giro frontal inferior izquierdo o el giro angular izquierdo no aporta gran cosa a la investigación lingüística. A menudo, las respuestas a las preguntas de la Lingüística deben entresacarse de esas otras conclusiones cuyas repercusiones nos son ajenas.

Otra consecuencia de esa presencia minoritaria de lingüistas en los equipos de investigación con técnicas de neuroimagen es la reiteración en el tipo de estímulos que se utilizan y en los fenómenos que se abordan, incluso en los errores de concepto subyacentes que se heredan de unos a otros. En su revisión de las publicaciones sobre evaluación intraoperativa (realizada mientras se interviene quirúrgicamente el cerebro), Zanin et al. (2017) concluyen:

La imagen global resultante de nuestro análisis indica que lo que se ha investigado en la bibliografía intraoperatoria es el procesamiento morfosintáctico, más que la sintaxis pura. El estudio de la neurobiología de la sintaxis durante la cirugía [con la persona] despierta, por tanto, parece estar todavía en una fase inicial, y necesita *investigaciones sistemáticas con base lingüística* (Zanin et al. 2017: 1579; el destacado en cursiva es nuestro).

El primer paso, si queremos satisfacer esa necesidad de fundamentar lingüísticamente las investigaciones sobre procesamiento del habla con técnicas de neuroimagen, es conseguir que la formación de los lingüistas incluya las bases necesarias para comprender y analizar los resultados de este tipo de trabajos, de modo que contemos con suficiente masa crítica. Además, es necesaria la integración de lingüistas en los equipos multidisciplinares que ponen en práctica esos estudios, con el fin de controlar las variables lingüísticas en la metodología y asegurar que los diseños experimentales están libres de errores como los mencionados anteriormente. La meta última sería lograr que la planificación completa de los estudios, y sus objetivos, respondan a intereses provenientes de la teoría lingüística. Es alentador comprobar que eso ya está sucediendo; un ejemplo es el trabajo de Tanaka et al. (2019) que demuestra la trascendencia de la operación *merge*, propuesta por el Programa Minimista, utilizando la fMRI: sus autores pertenecen a facultades de Lingüística. Contamos con investigadores destacados, tanto en el ámbito internacional como en el nacional, que ya han abierto el camino; esperemos que su número se incremente exponencialmente en los próximos años, lo cual conllevará, sin duda, un gran enriquecimiento mutuo de la Lingüística y la ciencia cognitiva.

5. Agradecimientos

Agradezco al prof. Michael Winterdahl, coordinador de la *Interdisciplinary Summer School on Neuroimaging – 2019 with special focus on imaging in research*, de Aarhus University, y a todo el equipo docente de la misma, la oportunidad de realizar el curso y la formación recibida para preparar este trabajo; por supuesto, también a los organizadores de Psylex V el haberme colocado ante al reto de llevarlo a cabo, y a los revisores y editoras sus sugerencias, que sin duda han mejorado el texto inicial. Cualquier error en el mismo es responsabilidad exclusiva de la autora.

6. Referencias

- Adank, Patti; Nuttall, Helen E.; Banks, Briony; Kennedy-Higgins, Daniel. 2015. Neural bases of accented speech perception. *Frontiers in human neuroscience* 9: 558.
- Armony, Jorge L.; Trejo-Martínez, David; Hernández, Dailett. 2012. Resonancia magnética funcional (RMf): principios y aplicaciones en neuropsicología y neurociencias cognitivas. *Neuropsicología Latinoamericana* 4.2: 36-50.
- Aziz-Zadeh, Lisa; Damasio, Antonio. 2008. Embodied semantics for actions: Findings from functional brain imaging. *Journal of Physiology-Paris* 102.1-3: 35-39.
- Bambini, Victoria; Canal, Paolo. 2021. Neurolinguistic Research on the Romance Languages. *Oxford Research Encyclopedia of Linguistics*. DOI: 10.1093/acrefore/9780199384655.013.443
- Barros-Loscertales, Alfonso; González, Julio; Pulvermüller, Friedemann; Ventura-Campos, Noelia, Bustamante, Juan Carlos; Costumero, Víctor; Parcet, María Antonia; Ávila, César. 2012. Reading salt activates gustatory brain regions: fMRI evidence for semantic grounding in a novel sensory modality. *Cerebral Cortex*, 22.11: 2554-2563.
- Barsalou, Lawrence W. 2010. Grounded cognition: Past, present, and future. *Topics in cognitive science* 2.4: 716-724.
- Belyk, Michel; Brown, Steven. 2014. Perception of affective and linguistic prosody: an ALE meta-analysis of neuroimaging studies. *Social cognitive and affective neuroscience* 9.9: 1395-1403.
- Ben-Shachar, Michal; Hendler, Talma; Kahn, Itamar; Ben Bashat, Dafna; Grodzinsky, Yosef. 2003. The neural reality of syntactic transformations: Evidence from functional magnetic resonance imaging. *Psychological science* 14.5: 433-440.
- Ben-Shachar, Michal; Palti, Dafna; Grodzinsky Yosef. 2004. Neural correlates of syntactic movement: Converging evidence from two fMRI experiments. *NeuroImage* 21: 1320-1336.
- Benítez-Burraco, Antonio. 2006. Caracterización neuroanatómica y neurofisiológica del lenguaje humano. *Revista Española de Lingüística* 35.2: 461-494.
- Benítez-Burraco, Antonio; Murphy, Elliot. 2019. Why brain oscillations are improving our understanding of language. *Frontiers in behavioral neuroscience* 13: 190.
- Beres, Anna M. 2017. Time is of the essence: A review of electroencephalography (EEG) and event-related brain potentials (ERPs) in language research. *Applied psychophysiology and biofeedback* 42.4: 247-255.
- Bernal, Byron; Ardila, Alfredo. 2016. From hearing sounds to recognizing phonemes: Primary auditory cortex is a truly perceptual language area. *AIMS Neur* 3.4: 454-473.
- Binder, Jeffrey R.; Desai, Rutvik H.; Graves, William W.; Conant, Lisa L. 2009. Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral cortex* 19.12: 2767-2796.
- Bookheimer, Susan. 2002. Functional MRI of language: new approaches to understanding the cortical organization of semantic processing. *Annual review of neuroscience* 25.1: 151-188.
- Brunellière, Angèle; Dufour, Sophie; Nguyen, Noël. 2011. Regional differences in the listener's phonemic inventory affect semantic processing: a mismatch negativity (MMN) study. *Brain and Language* 117.1: 45-51.
- Caplan, David. 2001. Functional neuroimaging studies of syntactic processing. *Journal of psycholinguistic research* 30.3: 297-320.

- Caplan, David; Alpert, Nathaniel; Waters, Gloria; Olivieri, Anthony. 2000. Activation of Broca's area by syntactic processing under conditions of concurrent articulation. *Human brain mapping* 9.2: 65-71.
- Carreiras, Manuel; Carr, Lindsay; Barber, Horacio A.; Hernandez, Arturo E. 2010. Where syntax meets math: Right intraparietal sulcus activation in response to grammatical number agreement violations. *Neuroimage* 49.2: 1741-1749.
- Chiao, Joan Y. (ed.). 2009. *Cultural neuroscience: Cultural influences on brain function*. Elsevier.
- Chiao, Joan. Y.; Cheon, Bobby K; Pornpattanakul, Narun; Mrazek, Alissa J.; Blizinsky, Katherine D. 2013. Cultural neuroscience: progress and promise. *Psychological inquiry* 24.1: 1-19.
- Chomsky, Noam. 1957. *Syntactic Structures*. Paris: Mouton.
- Chomsky, Noam. 1995. *The minimalist program*. Cambridge: MIT Press.
- Chomsky, Noam; Halle, Morris. 1968. *The sound pattern of English*. New York: Harper & Row.
- Cooke, Ayanna; Zurif, Edgar B.; DeVita, Christian; Alsop, David; Koenig, Phyllis; Detre, John; Gee, James; Pinango, Maria; Balogh, Jennifer; Grossman, Murray. 2002. Neural basis for sentence comprehension: Grammatical and short-term memory components. *Human brain mapping* 15.2: 80-94.
- Corrales-Quispircra, Carmen; Gadea, M. Engracia; Espert, Raúl. 2020. Estimulación de corriente continua transcraneal e intervención logopédica en personas con afasia: revisión sistemática de la bibliografía. *Rev Neurol* 70: 351-64.
- Damasio, Antonio R.; Tranel, Daniel. 1993. Nouns and verbs are retrieved with differently distributed neural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 90.11: 4957-4960.
- Damasio, Hanna; Tranel, D.; Grabowski, T. J.; Adolphs, R.; Damasio, Antonio. 2004. Neural systems behind word and concept retrieval. *Cognition* 92.1-2: 179-229.
- den Ouden, Dirk-Bart; Fix, Steve; Parrish, Todd B.; Thompson, Cynthia K. 2009. Argument structure effects in action verb naming in static and dynamic conditions. *Journal of Neurolinguistics* 22.2: 196-215.
- Dick, Antony S.; Bernal, Byron; Tremblay, Pascale. 2014. The language connectome: new pathways, new concepts. *The Neuroscientist* 20.5: 453-467.
- Dikker, Suzanne; Assaneo, M Florencia; Gwilliams, Laura; Wang, Lin; Kösem, Anne. 2020. Magnetoencephalography and language. *Neuroimaging Clinics* 30.2: 229-238.
- Dronkers, Nina F; Plaisant, Odile; Iba-Zizen, M. T.; Cabanis, Emmanuel Alain. 2007. Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong. *Brain* 130.5: 1432-1441.
- Erdocia, Kepa; Laka, Itziar. 2018. Negative transfer effects on L2 word order processing. *Frontiers in psychology* 9: 337.
- Feldman, Jerome; Narayanan, Srinivas. 2004. Embodied meaning in a neural theory of language. *Brain and language* 89.2: 385-392.
- Ferstl, Evelyn C.; Neumann, Jane; Bolger, Carsten; von Cramon, D. Yves. 2008. The extended language network: a meta-analysis of neuroimaging studies on text comprehension. *Human brain mapping* 29.5: 581-593.
- Fiebach, Christian J.; Schlwewsky, Matthias; Lohmann, Gabriele; von Cramon, D. Y.; Friederici, Angela D. 2005. Revisiting the role of Broca's area in sentence processing: syntactic integration versus syntactic working memory. *Human brain mapping* 24.2: 79-91.

- Fitzgerald, Des; Callard, Felicity. 2015. Social science and neuroscience beyond interdisciplinarity: Experimental entanglements. *Theory, Culture & Society* 32.1: 3-32.
- Friederici, Angela D.; Chomsky, Noam; Berwick, Robert C.; Moro, Andrea; Bolhuis, Johan J. 2017. Language, mind and brain. *Nature Human Behaviour* 1.10: 713-722.
- Frye, Richard E.; Rezaie, Roozbeh; Papanicolaou, Andrew. C. 2009. Functional neuroimaging of language using magnetoencephalography. *Physics of life reviews* 6.1: 1-10.
- Galantucci, Bruno; Fowler, Carol A.; Turvey, Michael T. 2006. The motor theory of speech perception reviewed. *Psychonomic Bulletin & Review* 13: 361-377.
- García-Pentón, Lorna; Pérez Fernández, Alejandro; Iturria-Medina, Yasser; Gillon-Dowens, Margaret; Carreiras, Manuel. 2014. Anatomical connectivity changes in the bilingual brain. *Neuroimage* 84: 495-504.
- Gerlach, Christian. 2007. A review of functional imaging studies on category specificity. *Journal of Cognitive Neuroscience* 19.2: 296-314.
- Giménez-Roldán, Santiago. 2017. Una revisión crítica sobre la contribución de Broca a la afasia: desde la prioridad al sombrerero Leborgne. *Neurosciences and History* 5.2: 58-68.
- González Álvarez, Julio. 2012. La representación neurobiológica de las palabras y sus significados en el cerebro. *Salud y Ciencia* 19: 126-9. <https://www.siicsalud.com/des/expertoimpreso.php/126104>
- González, Julio; Barros-Loscertales, Alfonso; Pulvermüller, Friedemann; Meseguer, Vanessa; Sanjuán, Ana; Belloch, Vicente; Ávila, César. 2006. Reading cinnamon activates olfactory brain regions. *Neuroimage* 32.2: 906-912.
- González, Rafael; Hornauer-Hughes, Andrea. 2014. Cerebro y lenguaje. *Revista Hospital Clínico Universidad de Chile* 25.1: 144-153.
- Goslin, Jeremy; Duffy, Hester; Floccia, Caroline. 2012. An ERP investigation of regional and foreign accent processing. *Brain and language* 122.2: 92-102.
- Grodzinsky, Yosef; Friederici, Angela D. 2006. Neuroimaging of syntax and syntactic processing. *Current opinion in neurobiology* 16.2: 240-246.
- Hämäläinen, Sini; Sairanen, Viljami; Leminen, Alina; Lehtonen, Minna. 2017. Bilingualism modulates the white matter structure of language-related pathways. *NeuroImage* 152: 249-257.
- Hari, Riita; Puce, Aina. 2017. *MEG-EEG Primer*. Oxford: Oxford University Press.
- Haro, Juan. 2022. Una introducción al uso de los potenciales evocados en el estudio del lenguaje. *Estudios de Lingüística del Español* 45: 185-204.
- Hassanpour, Mahlega S.; Eggebrecht, Adam T.; Culver, Joseph P.; Peelle, Jonathan E. 2015. Mapping cortical responses to speech using high-density diffuse optical tomography. *NeuroImage* 117: 319-326.
- Hauk, Olaf. 2016. What does it mean? A review of the neuroscientific evidence for embodied lexical semantics. En G. Hicko y S. L. Small, eds. *Neurobiology of language*. Academic press, pp. 777-788.
- Hauk, Olaf; Johnsrude, Ingrid; Pulvermüller, Friedemann. 2004. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron* 22: 301-307.
- Hauk, Olaf; Tschentscher, Nadja. 2013. The body of evidence: what can neuroscience tell us about embodied semantics? *Frontiers in psychology* 4: 50.
- Hernandez, Arturo E.; Kotz, Sonja A.; Hofmann, Juliane; Valentin, Vivian V.; Dapretto, Mirella; Bookheimer, Susan Y. 2004. The neural correlates of grammatical gender decisions in Spanish. *Neuroreport* 15.5: 863-866.

- Hernández, Mireia; Ventura-Campos, Noelia; Costa, Albert; Miró-Padilla, Anna; Ávila, César. 2019. Brain networks involved in accented speech processing. *Brain and language* 194: 12-22.
- Holmes, Emma; Zeidman, Peter; Friston, Karl J; Griffiths, Timothy D. 2021. Difficulties with speech-in-noise perception related to fundamental grouping processes in auditory cortex. *Cerebral Cortex* 31.3: 1582-1596.
- Horwitz, Barry; Poeppel, David. 2002. How can EEG/MEG and fMRI/PET data be combined? *Human brain mapping* 17.1: 1-3.
- Horwitz, Barry; Wise, Richard J. 2008. PET research of language. En Brigitte Stemmer y Harry A. Whitaker, eds. *Handbook of the neuroscience of language*. Academic Press, pp. 71-80.
- Huneau, Clément; Benali, Habib; Chabriat, Hugues. 2015. Investigating human neurovascular coupling using functional neuroimaging: a critical review of dynamic models. *Frontiers in neuroscience* 9: 467.
- Immordino-Yang, Mary Helen. 2013. Studying the effects of culture by integrating neuroscientific with ethnographic approaches. *Psychological Inquiry* 24.1: 42-46.
- Jakobson, Roman; Fant, Gunnar; Halle, Morris. 1952. *Preliminaries to speech analysis. The distinctive features and their correlates*. Cambridge: The MIT Press
- Johnsrude, Ingrid S.; Giraud, Anne Lise; Frackowiak, Richard S. 2002. Functional imaging of the auditory system: the use of positron emission tomography. *Audiology and Neurotology* 7.5: 251-276.
- Joseph, Jane E. 2001. Functional neuroimaging studies of category specificity in object recognition: a critical review and meta-analysis. *Cogn Affect Behav Neurosci* 1: 119-136.
- Just, Marcel Adam; Carpenter, Patricia A.; Keller, Timothy A.; Eddy, William; Thulborn, Keith. 1996. Brain activation modulated by sentence comprehension. *Science* 274.5284: 114-116.
- Kanero, Junko; Imai, Mutsumi; Okuda, Jiro; Okada, Hiroyuki; Matsuda, Tetsuya. 2014. How sound symbolism is processed in the brain: a study on Japanese mimetic words. *PLoS one* 9.5: e97905.
- Kekic, Maria; Boysen, Elena; Campbell, Iain C.; Schmidt, Ulrike. 2016. A systematic review of the clinical efficacy of transcranial direct current stimulation (tDCS) in psychiatric disorders. *Journal of psychiatric research* 74: 70-86.
- Kemmerer, David. 2014. Word classes in the brain: Implications of linguistic typology for cognitive neuroscience. *Cortex* 58: 27-51.
- La Vaque, T. J. 1999. The history of EEG Hans Berger. *Journal of Neurotherapy: Investigations in Neuromodulation, Neurofeedback and Applied Neuroscience* 3.2: 1-9.
- Lambon Ralph, Matthew; Jefferies, Elizabeth; Patterson, Karalyn; Rogers, Timothy. 2017. The neural and computational bases of semantic cognition. *Nature Reviews Neuroscience* 18.1: 42-55.
- Lieberman, Alvin M.; Mattingly, Ignatius G. 1985. The motor theory of speech perception revised. *Cognition* 21.1: 1-36.
- Lizarazu, Mikel. 2017. *Speech-brain synchronization: a possible cause for developmental dyslexia*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.
- Ljungberg, E.; Damestani, Nikou L.; Wood, Tobias C.; Lythgoe, David J.; Zelaya, Fernando; Williams, Steven C.R.; Solana, Ana Beatriz; Barker, Gareth J.; Wiesinger, Florian. 2021. Silent zero TE MR neuroimaging: Current state-of-the-

- art and future directions. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy* 123: 73-93.
- Martín-Loeches, Manuel; Casado, Pilar; Hernández-Tamames, Juan A.; Álvarez-Linera, Juan. 2008. Brain activation in discourse comprehension: a 3t fMRI study. *Neuroimage* 41.2: 614-622.
- Meltzer-Asscher, Aya; Mack, Jennifer E.; Barbieri, Elena; Thompson, Cynthia K. 2015. How the brain processes different dimensions of argument structure complexity: Evidence from fMRI. *Brain and language* 142: 65-75.
- Meltzer-Asscher, Aya; Schuchard, Julia; den Ouden, Dirk-Bart; Thompson, Cynthia K. 2013. The neural substrates of complex argument structure representations: Processing “alternating transitivity” verbs. *Language and cognitive processes* 28.8: 1154-1168.
- Mercadillo, Roberto E.; Díaz, José Luis. 2013. Neuroscience and ethnography: an interdisciplinary revision and a cognitive proposal based on compassion research in Mexico. *International journal of psychological research* 6: 94-108.
- Miniussi, Carlo; Cotelli, Maria; Manenti, Rosa. 2010. Transcranial Magnetic Stimulation in the Study of Language and Communication. En M. Balconi, ed. *Neuropsychology of Communication*. Milán: Springer, pp. 47-59.
- Mitsuhashi, Takumi; Sugano, Hidenori; Asano, Keiko; Nakajima, Takayuki; Nakajima, Madoka; Okura, Hidehiro; Iimura, Yasushi, Suzuki, Hiroharu; Tange, Yuichi; Tanaka, Toshihisa; Aoki, Shigeki; Arai, Hajime. 2020. Functional MRI and structural connectome analysis of language networks in Japanese-English bilinguals. *Neuroscience* 431: 17-24.
- Mohades, Seyede Ghazal; Struys, Esli; Van Schuerbeek, Peter; Mondt, Katrien; Van De Craen, Piet; Luypaert, Robert. 2012. DTI reveals structural differences in white matter tracts between bilingual and monolingual children. *Brain Research* 1435: 72-80.
- Molinaro, Nicola; Barber, Horacio A.; Pérez, Alejandro; Parkkonen, Lauri; Carreiras, Manuel. 2013. Left fronto-temporal dynamics during agreement processing: Evidence for feature-specific computations. *NeuroImage* 78: 339-352.
- Mompeán, José A.; Fregier, Amandine; Valenzuela, Javier. 2020. Iconicity and systematicity in phonaestemes: A cross-linguistic study. *Cognitive Linguistics* 31.3: 515-548.
- Monti, Alessia; Ferrucci, Roberta; Fumagalli, Manuela; Mameli, Francesca; Cogiamanian, Filippo; Ardolino, Gianluca; Prioriet, Alberto. 2013. Transcranial direct current stimulation (tDCS) and language. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry* 84.8: 832-842.
- Murphy, Elliot. 2018. Interfaces (travelling oscillations) + recursion (delta-theta code) = language. En E. M. Luef y M. Marín, eds. *The Talking Species: Perspectives on the Evolutionary, Neuronal and Cultural Foundations of Language*. Graz: Unipress Graz Verlag: 251-269
- Murphy, Elliot. 2020. *The oscillatory nature of language*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nuttall, Helen E.; Kennedy-Higgins, Dan; Devlin, Joseph T.; Adank, Patti. 2018. Modulation of intra-and inter-hemispheric connectivity between primary and premotor cortex during speech perception. *Brain and language* 187: 74-82.
- Ohta, Shinri; Fukui, Naoki; Sakai, Kuniyoshi L. 2013. Computational principles of syntax in the regions specialized for language: integrating theoretical linguistics and functional neuroimaging. *Frontiers in behavioral neuroscience* 7: 204.

- Palm, Ulrich; Hasan, Alkomiet; Strube, Wolfgang; Padberg, Frank. 2016. tDCS for the treatment of depression: a comprehensive review. *European archives of psychiatry and clinical neuroscience* 266.8: 681-694.
- Paredes Duarte, María Jesús; Varo Varo, Carmen. 2006. Lenguaje y cerebro: conexiones entre neurolingüística y psicolingüística. En B. Gallardo, C. Hernández y V. Moreno, eds. *Lingüística clínica y neuropsicología cognitiva. Actas del Primer Congreso Nacional de Lingüística Clínica. Vol 1: Investigación e intervención en patologías del lenguaje*. Valencia: Universitat, pp. 107-119.
- Peelle, Jonathan E. 2017. Optical neuroimaging of spoken language. *Language, cognition and neuroscience* 32.7: 847-854.
- Phillips, Aaron A.; Chan, Franco Hn.; Zi Zheng, Mei Mu; Krassioukov, Andrei V.; Ainslie, Philip. 2016. Neurovascular coupling in humans: physiology, methodological advances and clinical implications. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism* 36.4: 647-664.
- Pliatsikas, Christos; Meteyard, Lotte; Veríssimo, João; DeLuca, Vincent; Shattuck, Kyle; Ullman, Michael T. 2020. The effect of bilingualism on brain development from early childhood to young adulthood. *Brain Structure and Function* 225.7: 2131-2152.
- Poldrack, Russell A.; Baker, Chris I.; Durnez, Joke; Gorgolewski, Krzysztof J.; Matthews, Paul M.; Munafò, Marcus R.; Nichols, Thomas E.; Poline, Jean-Baptiste; Vul, Edward; Yarkoni, Tal. 2017. Scanning the horizon: towards transparent and reproducible neuroimaging research. *Nature reviews neuroscience* 18.2: 115-126.
- Przeździk, Izabela; Haak, Koen V.; Beckmann, Christian F.; Bartsch, Andreas. 2019. The human language connectome. En P. Hagoort, ed. *Human language: From genes and brains to behavior*. Cambridge, MA: The MIT Press, pp. 467-480.
- Price, Cathy J. 2010. The anatomy of language: a review of 100 fMRI studies published in 2009. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1191.1: 62-88.
- Price, Cathy J. 2012. A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. *Neuroimage* 62.2: 816-847.
- Pulvermüller, Friedemann. 2013. How neurons make meaning: brain mechanisms for embodied and abstract-symbolic semantics. *Trends in cognitive sciences* 17.9: 458-470.
- Pulvermüller, Friedemann; Fadiga Luciano. 2010. Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. *Nat Rev Neurosci* 11: 351-360.
- Pulvermüller, Friedemann; Shtyrov, Yuri; Ilmoniemi, Risto. 2005. Brain signatures of meaning access in action word recognition. *J Cogn Neurosci* 17: 884-892.
- Quaresima, Valentina; Bisconti, Silvia; Ferrari, Marco. 2012. A brief review on the use of functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) for language imaging studies in human newborns and adults. *Brain and language* 121.2: 79-89.
- Raichle, Marcus E. 2009. A brief history of human brain mapping. *Trends in neurosciences* 32.2: 118-126.
- Rampinini, Alessandra C.; Ricciardi, Emiliano. 2017. In favor of the phonemic principle: a review of neurophysiological and neuroimaging explorations into the neural correlates of phonological competence. *Studi e Saggi Linguistici* 55.1: 95-123.
- Ramsey, Nick F.; Salari, Efraim; Aarnoutse, Erik J.; Vansteensel, Mariska; Bleichner, Martin Georg; Freudenburg Z. V. 2018. Decoding spoken phonemes from sensorimotor cortex with high-density ECoG grids. *Neuroimage* 180: 301-311.

- Revill, Kate Pirog; Namy, Laura L.; Clepper DeFife, Lauren; Nygaard, Lynne C. 2014. Cross-linguistic sound symbolism and crossmodal correspondence: Evidence from fMRI and DTI. *Brain and Language* 128.1: 18-24.
- Rizzolatti, Giacomo; Fadiga, Luciano; Gallese, Vittorio; Fogassi, Leonardo. 1996. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive brain research* 3.2: 131-141.
- Rogalsky, Corianne; Love, Tracy; Driscoll, David; Anderson, Steven W.; Hickok, Gregory. 2011. Are mirror neurons the basis of speech perception? Evidence from five cases with damage to the purported human mirror system. *Neurocase* 17.2: 178-187.
- Rogers, Jack C.; Möttönen, Riikka; Boyles, Rowan; Watkins, Kate E. 2014. Discrimination of speech and nonspeech sounds following theta-burst stimulation of the motor cortex. *Frontiers in Psychology* 5: 754.
- Santi, Andrea; Grodzinsky, Yosef. 2010. fMRI adaptation dissociates syntactic complexity dimensions. *Neuroimage* 51.4: 1285-1293.
- Saussure, Ferdinand de. 1916. *Cours de linguistique générale*. Paris: Payot.
- Schomers, Malte R.; Pulvermüller, Friedemann. 2016. Is the sensorimotor cortex relevant for speech perception and understanding? An integrative review. *Frontiers in human neuroscience* 10: 435.
- Sekiyama, Kaoru; Kanno, Iwao; Miura, Shuichi; Sugita, Yoichi. 2003. Auditory-visual speech perception examined by fMRI and PET. *Neuroscience research* 47.3: 277-287.
- Seligman, Rebecca; Brown, Ryan A. 2010. Theory and method at the intersection of anthropology and cultural neuroscience. *Social cognitive and affective neuroscience* 5.2-3: 130-137.
- Scherer, Liliane C.; Kahlaoui, Karima; Ansaldo, Ana I. 2009. Espectrografía funcional de infrarrojo cercano (fNIRS): la técnica y su aplicación en estudios de lenguaje. *Neuropsicología Latinoamericana* 1.1: 57-62.
- Stasencko, Alena; Garcea, Frank E.; Mahon, Bradford Z. 2013. What happens to the motor theory of perception when the motor system is damaged? *Language and cognition* 5.2-3: 225-238.
- Tanaka, Kyohei; Nakamura, Issa; Ohta, Shinri; Fukui, Noaki; Zushi, Mihoko; Narita, Hiroki; Sakai, Kuniyoshi L. 2019. Merge-generability as the key concept of human language: evidence from neuroscience. *Frontiers in psychology* 10: 2673.
- Teige, Catarina; Cornelissen, Piers L.; Mollo, Giovanna; Gonzalez Alam, Tirso Rene del Jesus; McCarty, Kristofor; Smallwood, Jonathan; Jefferies, Elizabeth. 2019. Dissociations in semantic cognition: Oscillatory evidence for opposing effects of semantic control and type of semantic relation in anterior and posterior temporal cortex. *Cortex* 120: 308-325.
- Thompson-Schill, Sharon L. 2003. Neuroimaging studies of semantic memory: inferring “how” from “where”. *Neuropsychologia* 41.3: 280-292.
- Thompson, Cynthia K.; Bonakdarpour, Borna; Fix, Stephen C.; Blumenfeld, Henrike K.; Parrish, Todd B.; Gitelman, Darren; Mesulam, M. Marsel. 2007. Neural correlates of verb argument structure processing. *Journal of Cognitive Neuroscience* 19.11: 1753-1767.
- Tremblay, Pascale; Dick, Anthony S. 2016. Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain and language* 162: 60-71.
- Vansteensel, Mariska J.; Pels, Elmar G.M.; Bleichner, Martin G.; Branco, Mariana P.; Denison, Timothy; Freudenburg, Zachary V.; Gosselaar, Peter; Leinders, Sacha; Ottens, Thomas H.; Van Den Boom, Max A.; Van Rijen, Peter C.; Aarnoutse, Erik

- J.; Ramsey, Nick F. 2016. Fully Implanted Brain-Computer Interface in a Locked-In Patient with ALS. *N Engl J Med* 375: 2060-2066.
- Varo Varo, Carmen. 2017. Nuevos retos en la investigación del contenido léxico: elementos para una neurosemántica. *Rilce: Revista de Filología Hispánica* 33.3: 1032-1059.
- Vassal, François; Schneider, Fabien; Boutet, Claire; Jean, Betty; Sontheimer, Anna; Lemaire, Jean-Jacques. 2016. Combined DTI tractography and functional MRI study of the language connectome in healthy volunteers: extensive mapping of white matter fascicles and cortical activations. *PloS one* 11.3: e0152614.
- Vigliocco, Gabriella; Vinson, David P.; Druks, Judit; Barber, Horacio; Cappa, Stefano F. 2011. Nouns and verbs in the brain: a review of behavioural, electrophysiological, neuropsychological and imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 35.3: 407-426.
- Wang, Lin; Schoot, Lotte; Brothers, Trevor; Alexander, Edward; Warnke, Lena; Minjae, Kim; Khan, Sheraz; Hamalainen, Matti; Kuperberg, Gina R. 2021, en revisión. Dynamic predictive coding across the left fronto-temporal language hierarchy: Evidence from MEG, EEG and fMRI. *bioRxiv*.
- Waters, Gloria; Caplan, David; Alpert, Nathaniel; Stanczak, Louise. 2003. Individual differences in rCBF correlates of syntactic processing in sentence comprehension: effects of working memory and speed of processing. *NeuroImage* 19.1: 101-112.
- Watkins, Kate E.; Strafella, Antonio P.; Paus, Tomás. 2003. Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia* 41.8: 989-994.
- Westwood, Samuel J.; Olson, Andrew; Miall, Chris R.; Nappo, Raffaele; Romani, Cristina. 2017. Limits to tDCS effects in language: failures to modulate word production in healthy participants with frontal or temporal tDCS. *Cortex* 86: 64-82.
- Wilson, Stephen M.; Iacoboni, Marco. 2006. Neural responses to non-native phonemes varying in producibility: evidence for the sensorimotor nature of speech perception. *NeuroImage* 33.1: 316-325.
- Wilson, Stephen M.; Saygin, Ayse Pinar; Sereno, Martin I.; Iacobini, Marco. 2004. Listening to speech activates motor areas involved in speech production. *Nature neuroscience* 7.7: 701-702.
- Yuan, Zhen; Ye, JongChul. 2013. Fusion of fNIRS and fMRI data: identifying when and where hemodynamic signals are changing in human brains. *Frontiers in human neuroscience* 7: 676.
- Zanin, Elia; Riva, Marco; Bambini, Valentina; Cappa, Stefano F.; Magrassi, Lorenzo; Moro, Andrea. 2017. The contribution of surgical brain mapping to the understanding of the anatomo-functional basis of syntax: A critical review. *Neurological Sciences* 38.9: 1579-1589.
- Zawiszewski, Adam; Laka, Itziar. 2020. Bilinguals processing noun morphology: Evidence for the Language Distance Hypothesis from event-related potentials. *Journal of Neurolinguistics* 55: 100908.

¹ En uno de esos increíbles casos en la historia de la ciencia, ese cerebro se ha conservado hasta nuestros días, lo cual permitió su reanálisis con modernas técnicas de resonancia magnética (Dronkers et al. 2007).

² Calificadas así porque permiten observar las regiones del cerebro que están activas (funcionando) en el momento del registro (Raichle 2009).

³ Espectroscopía funcional del infrarrojo cercano (fNIRS), y tomografía óptica difusa de alta densidad, (HD-DOT, por sus siglas en inglés); más adelante se describirán brevemente, pero puede verse un resumen de sus características en Peelle (2017).

⁴ Por ejemplo, los trabajos de Chiao (2009), Seligman y Brown (2010), Chiao et al. (2013), Mercadillo y Díaz (2013), Immordino-Yang (2013), Fitzgerald y Callard (2015), etc.

⁵ Entre los lingüistas españoles que trabajan con esta técnica está Itziar Laka, en la Universidad del País Vasco, con una línea sobre procesamiento en bilingües (Zawiszewski y Laka 2020; Erdocia y Laka 2018; etc.).

⁶ Son sustancias que se desintegran al poco de su creación: el oxígeno ^{15}O , tarda un par de minutos en hacerlo, mientras que la fluordesoxiglucosa, F^{18} , llega a permanecer casi dos horas.

⁷ Como muestra de ese predominio, los estudios publicados utilizando esta metodología en un solo año permitieron la realización de un meta-análisis sobre más de cien referencias (Price 2010).

⁸ Al principio era de medio tesla (T), pero desde 2010 hay máquinas de 7T; las más habituales son de 3T, unas 60000 veces el campo magnético de la Tierra.

⁹ Como el francés del sur frente al estándar (Brunellière et al. 2011), el inglés del sudeste de Inglaterra frente al de Gales, Yorkshire o el inglés como lengua extranjera (Goslin et al. 2012). Puede verse una revisión en Adank et al. (2015).

¹⁰ Algunas referencias interesantes a este respecto son Feldman y Narayanan (2004), Aziz-Zadeh y Damasio (2008), Hauk y Tschentscher (2013), o la revisión de Hauk (2016), entre otras.