

Análisis de conectividad funcional en el procesamiento de violaciones gramaticales de lenguaje natural y artificial: evidencia de mecanismos compartidos

Sebastián Moguilner¹, Ángel Tabullo² y Alejandro Wainseboim²

¹Funesmen, Universidad Nacional de Cuyo-Comisión Nacional de Energía Atómica. Mendoza, Argentina

²Grupo de Lingüística y Neurobiología Experimental del Lenguaje, Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales, CONICET. Mendoza, Argentina

Resumen

La comprensión del lenguaje es un proceso de extrema complejidad. El estudio de sus bases neurofisiológicas se ha facilitado gracias al registro de la actividad electroencefalográfica, (EEG), identificándose potenciales evocados relacionados con procesos cognitivos específicos durante el procesamiento de oraciones o palabras. Los potenciales evocados son el producto de la actividad en diversas bandas de frecuencia del EEG. La descomposición de la señal en dichas bandas posibilita distinguir diferentes actividades con distintos valores funcionales y la manera en la cual distintas regiones interactúan durante el proceso de comprensión del lenguaje. En este trabajo analizamos para tres bandas de frecuencias distintas (theta, alfa y beta), el grado de conectividad funcional entre electrodos durante el procesamiento de oraciones gramaticales y no gramaticales en lenguaje natural y artificial. 15 adultos sanos fueron entrenados en las reglas combinatorias de una gramática artificial. En el testeo se registró la actividad electroencefalográfica mientras se presentaban 80 ensayos nuevos, de los cuales 40 presentaba un error de las reglas entrenadas. Se presentaron además 80 oraciones en castellano, 40 de ellas con un error gramatical. La aparición de un error elicó un potencial N400 y P600 equivalente en ambas gramáticas, e indujo en ambos casos un mismo

Correspondencia con los autores: awainseboim@gmail.com

Artículo recibido: 6 de octubre de 2018

Artículo aceptado: 20 de diciembre de 2018

Este trabajo recibió el Primer Premio de la categoría Adultos en el XIII Congreso Argentino de Neuropsicología-SONEPSA 2018.

<http://www.revneuropsi.com.ar>

ISSN: 1668-5415

patrón de conectividad funcional entre electrodos. Los resultados muestran que el procesamiento de oraciones no gramaticales durante la comprensión del lenguaje natural es funcionalmente equivalente a la detección de errores combinatorios de reglas estadísticas, como las entrenadas en gramática artificial.

Palabras clave: gramática natural- gramática artificial- potenciales evocados- bandas de frecuencia- conectividad funcional

Abstract

Functional connectivity analysis during processing of grammatical violations of natural and artificial language: evidence for shared mechanisms. Language comprehension is an extremely complex process. The study of its neurophysiological bases has been facilitated due to the use of electroencephalographic (EEG) recordings, identifying evoked potentials related to specific cognitive processes during sentence or word processing. Evoked potentials are the product of activity in different frequency bands of the EEG. Signal decomposition into these frequency bands allows to distinguish between activities with different functional values and the manner in which regions interact during language comprehension. In the present work we analyzed for three frequency bands (theta, alpha and beta), the level of functional connectivity between electrodes while processing grammatical and non-grammatical sentences in natural and artificial language. 15 normotypic adults were trained in the use of combinatorial rules of an artificial grammar. In the test phase, EEG activity was recorded while 80 new trials were presented, 40 of which showed an error of the previously trained rules. In addition, 80 Spanish sentences were presented, 40 of which had a grammatical error. The appearance of an error elicited a biphasic N400/P600 complex, and induced the same pattern of functional connectivity in both grammars. Results show that processing of non-grammatical sentences during natural language comprehension is functionally equivalent to the detection of combinatorial errors of statistical rules, such as those trained in the artificial grammar.

Keywords: Natural grammar- Artificial grammar- Evoked potentials – Frequency bands- Functional connectivity

1. Introducción

Los procesos cognitivos involucrados en la producción y comprensión del lenguaje han sido extensamente estudiados en las últimas décadas mediante diversidad de paradigmas experimentales.

<http://www.revneuropsi.com.ar>
ISSN: 1668-5415

Uno de ellos, el paradigma de aprendizaje de gramáticas artificiales (Reber, 1967) ha sido aplicado al estudio de fenómenos de aprendizaje implícito, y en particular, a la adquisición de aspectos sintácticos del lenguaje. Una gramática artificial consiste en una serie de elementos (que pueden ser letras, fonemas, palabras o incluso estímulos visuales) y un conjunto específico de reglas para combinarlos en secuencias. En este tipo de tareas, se presenta un número de secuencias construidas de acuerdo a estas reglas combinatorias, y luego del entrenamiento los sujetos son capaces de discriminar secuencias nuevas que cumplen con las reglas de la gramática de otras incorrectas, mostrando un rendimiento superior al azar en esta clasificación (Reber, 1967). Este resultado se observa aún cuando los sujetos no estén advertidos de la existencia de reglas en la estructura de las secuencias, y/o afirmen no haber aprendido ni aplicado ningún conocimiento al respecto. En ausencia de contenido semántico, los sujetos sólo cuentan con información de tipo estadística para aprender cómo los elementos pueden ordenarse y combinarse entre sí. Se han propuesto numerosas fuentes de información estadística que podrían explicar el desempeño en la tarea, incluyendo la frecuencia de bigramas y trigramas dentro de las secuencias (e.g. Perruchet & Pacteau, 1990; Redington & Chater, 1996) la repetición de elementos dentro de las secuencias (Gómez et al., 1999; Whittlesea & Dorken, 1993) o la similitud global entre los items de test y los de entrenamiento (e.g., Vokey & Brooks, 1992).

En relación al lenguaje, las gramáticas artificiales se han aplicado como modelo para estudiar la participación de fenómenos estadísticos en la adquisición de aspectos que van desde la segmentación de fonemas (Maye et al., 2002) y palabras (Peña et al., 2002) hasta la adquisición de estructuras de frase y categorías sintácticas (Saffran, 2002; Thompson & Newport, 2007). En este contexto, la fuente de información más relevante para la adquisición son las dependencias predictivas, i.e. patrones de co-ocurrencia que determinan la probabilidad de encontrar un elemento de una categoría a partir de la aparición previa de otro elemento. A diferencia de las otras fuentes de información probabilística, éstas no dependen de las propiedades superficiales del estímulo. Las dependencias predictivas pueden plantearse en términos de probabilidades condicionales del tipo: dada la aparición de la clase X, ¿cuál es la posibilidad de encontrar un elemento de la clase Y a continuación? (Saffran, 2001).

Sin embargo, para que puedan ser consideradas un paradigma válido en el estudio del lenguaje, es necesario encontrar evidencia de mecanismos neurales compartidos en el procesamiento de gramáticas artificiales y estructuras sintácticas del lenguaje. Hasta el momento, estudios de neuroimagen han señalado que ciertas regiones cerebrales típicamente vinculadas al procesamiento del lenguaje (en particular, el área de Broca – Áreas de Brodmann 44/45) se activan durante el procesamiento de gramáticas artificiales (Petersson et al., 2004; Petersson et al., 2012). Sin embargo, las técnicas de neuroimágenes, si bien posibilitan estudiar áreas cerebrales activadas durante la realización de procesos mentales diferentes, poseen una baja resolución temporal intrínseca. En este sentido, el registro electroencefalográfico (EEG) permite obtener información en el orden de los milisegundos, posibilitando estudiar la

dinámica temporal de los procesos cognitivos involucrados durante el procesamiento del lenguaje con mucho mayor precisión. La promediación de segmentos sucesivos del trazado EEG sincronizados con la aparición de un estímulo o evento específico permite aumentar la relación señal-ruido, eliminando la actividad de fondo no relacionada con el procesamiento analizado. Como resultado, se observan en el trazado oscilaciones caracterizadas por una relación temporal con respecto al estímulo que las genera (denominada latencia), una distribución a lo largo del cuero cabelludo (topografía) y una polaridad característica (negativa o positiva). Estas oscilaciones se denominan potenciales cerebrales o componentes, y representan la actividad eléctrica de los circuitos neurales involucrados en los procesos sensoriales o cognitivos estudiados. Mediante esta técnica, ha sido posible identificar distintos potenciales relacionados con eventos en tareas de lenguaje. El primero en haber sido identificado ha sido el potencial N400 (Kutas & Hillyard, 1980), una negatividad con distribución típicamente centro-parietal, hallada en contextos de anomalías o violaciones de expectativa a nivel semántico, y que se desarrolla aproximadamente entre los 300 a 500 ms posteriores a la presentación del estímulo crítico. Se observó originalmente en finales de oraciones semánticamente incongruentes con el contexto previo (“de visita en la ciudad, cené con unas viejas *camisetas*”). El componente mostró ser además sensible a la distancia semántica entre la palabra semánticamente aceptable y la violación presentada (Federmeier y Kutas, 1999). Oraciones semánticamente plausibles, pero incongruentes con la experiencia previa de los sujetos también producen efectos N400 comparables a los de las violaciones semánticas (Hagoort et al., 2004). El N400 también puede observarse en palabras semánticamente congruentes con la oración, pero inesperadas. En ese caso, la magnitud del potencial está modulada por la expectativa asociada a la palabra en el contexto oracional en el que se la presenta (Kutas y Hillyard, 1984). Incluso en ausencia de un contexto semántico, el N400 generado por palabras aisladas es inversamente proporcional a su frecuencia de uso en el idioma (Rugg, 1990). La diversidad de contextos y variables que modulan el potencial N400 ha llevado a algunos autores a concluir que el potencial refleja el costo de procesos de integración semántica (Hagoort et al., 2009) y a otros a ubicar su origen en procesos de acceso a información léxico-semántica (Kutas & Federmeier, 2000; Van Berkum, 2009).

Por otra parte, diversos estudios de procesamiento del lenguaje han descripto; Hagoort et al., 1993) o de estructura de frase (Hagoort et al., 1993; Neville et al., 1991). El potencial también se observa en estructuras gramaticalmente correctas, pero inesperadas de acuerdo al contexto oracional previo, tales como las continuaciones no preferidas en oraciones sintácticamente ambiguas (Kaan & Swab, 2003; Osterhout y Holcomb, 1992; Osterhout et al., 1994). Por último, el potencial se observa en casos de dependencias estructurales de larga distancia (Felser et al., 2003; Fiebach et al., 2002; Kaan et al., 2000). Una primera interpretación del potencial se planteó en términos de procesos de reanálisis o reparación sintáctica (Müntz et al., 1997), que ocurrían en una etapa tardía del procesamiento sintáctico, mientras que una interpretación posterior del potencial planteó que éste no estaba restringido a

situaciones de reparación o reanálisis, sino que reflejaba el costo de integración de una palabra con el contexto sintáctico previo (Kaan et al., 2000). Según esta interpretación, a fin de poder analizar e integrar los diferentes componentes de la oración, el sujeto realiza predicciones acerca de las estructuras sintácticas futuras más probables, que permiten preactivar sus representaciones y facilitar su procesamiento cuando éstas son percibidas (Gibson, 1998). La integración es el proceso por el cual los nuevos estímulos son combinados con la estructura previamente construida, el cual resulta más costoso cuando estos estímulos no han sido facilitados por las predicciones previas. Esta interpretación permitió explicar la mayoría de las instancias observadas del potencial, por lo cual actualmente se acepta que el P600 refleja procesos de predicción e integración en el contexto del procesamiento sintáctico del lenguaje (Hagoort 2003, 2009).

Pocos estudios hasta el momento han analizado los potenciales evocados en el contexto de aprendizajes de gramáticas artificiales. Christiansen et al. (2012), comparó los potenciales cerebrales evocados luego de anomalías sintácticas en gramáticas artificiales y oraciones de lenguaje natural, hallando potenciales P600 comparables en ambos contextos (Christiansen et al., 2012). Sin embargo, al incluir escenas visuales como referentes durante el entrenamiento de las secuencias de la gramática, no se trató de un aprendizaje en ausencia de contenido semántico, y por tanto no fue posible analizar de manera directa la existencia de mecanismos neurales compartidos con el procesamiento de la sintaxis natural. En este sentido, Tabullo et al. (2013) analizaron los potenciales cerebrales evocados por violaciones estructurales en una gramática artificial sin contenido semántico y oraciones del lenguaje en el mismo grupo de sujetos, con el objetivo de estudiar si el procesamiento de errores combinatorios en una gramática artificial sin contenido semántico involucraba mecanismos neurales comunes a los típicamente observados para el procesamiento de la sintaxis del lenguaje. Los resultados mostraron que a excepción de una ventana temprana (200-400 ms), la aparición de errores combinatorios en una gramática artificial y de violaciones sintácticas en gramática natural, suscitaba el mismo patrón N400/P600 en ambas gramáticas.

Si bien el análisis de potenciales evocados ha aportado información valiosa respecto de los procesos cognitivos que subyacen al procesamiento del lenguaje, sus alcances son limitados, ya que el ERP es producto de cambios suscitados en la amplitud y/o fase de las oscilaciones que la componen. Estas limitaciones pueden superarse en parte, al descomponer la señal de EEG en bandas de frecuencias específicas. Típicamente las bandas se dividen en delta (1-3 Hz); theta (4-7 Hz); alfa (8-12 Hz); beta (13-30) y gama >30 Hz). El análisis por frecuencias permite estudiar los cambios de amplitud (potencia) de cada banda, como así también cambios de fase suscitados por la aparición de estímulos específicos en el protocolo experimental considerado. Uno de los aspectos más importantes del análisis de fases es que permite estudiar la sincronización de las señales obtenidas en distintos puntos de muestreo (electrodos en el caso del EEG). Un aumento de la sincronización de las señales en dos o más electrodos, es indicativo de un aumento en el grado de conectividad

funcional entre dichos puntos. Por tanto, el análisis de sincronización de fases por bandas de frecuencias permite analizar el grado de conectividad funcional presente en momentos específicos del experimento desarrollado. Este tipo de análisis ha permitido estudiar distintos aspectos relacionados con el procesamiento del lenguaje. Bastianseen et al. (2002), por ejemplo, hallaron para theta un aumento en el grado de sincronización entre electrodos frontales durante la presentación de oraciones con errores semánticos o sintácticos, siendo interpretado por los autores, como una consecuencia de procesos de acceso léxico-semántico. En forma más reciente, Ewald et al. (2012), durante una tarea de nombramiento de imágenes (picture naming task), hallaron un incremento de sincronización para theta entre electrodos frontales y occipito-temporales, posiblemente relacionado con procesos léxico-semánticos durante la planificación de la producción oral. A su vez, Brunetti et al. (2013) durante la presentación de palabras pertenecientes a diferentes categorías semánticas en el contexto de una tarea de decisión léxica, hallaron un aumento de la sincronización entre electrodos frontales y parietales tanto para theta como para gamma, interpretándose como un efecto del aumento de recursos neuronales involucrados ante la aparición de palabras semánticamente relevantes para la compleción de la tarea. Weiss y Janek (2007) hallaron que la presentación de oraciones semánticamente incongruentes elicita una disminución de sincronización entre electrodos frontales y un aumento de sincronización entre electrodos parietales y temporales, mientras que las oraciones semánticamente congruentes inducían aumentos de sincronización en electrodos frontales y temporales izquierdos, los cuales podrían estar señalando un incremento en el grado de unión de la actividad neuronal entre regiones distantes.

Los estudios citados, muestran cómo en los últimos años, el análisis de sincronización por bandas de frecuencia, ha aportado información valiosa respecto de la conectividad funcional durante el procesamiento del lenguaje. Hasta el momento, sin embargo, no se han encarado estudios de este tipo para el análisis del procesamiento de gramáticas artificiales. Tal como fuera mencionado previamente, el uso de gramáticas artificiales posibilita separar por completo aspectos semánticos y sintácticos, a la vez que posibilita analizar el aporte del uso de información estadística durante el procesamiento gramatical. En el presente trabajo, basándonos en el estudio de Tabullo et al. (2013), nos planteamos estudiar el patrón de conectividad funcional durante el procesamiento de oraciones de lenguaje natural y artificial gramaticalmente correctas e incorrectas. En particular nos planteamos: i) estudiar cuál es la sincronización entre regiones que caracteriza al P300, N400 y P600 elicitados por el procesamiento de oraciones gramaticales y no gramaticales tanto en castellano como en gramática artificial; ii) analizar qué similitudes o diferencias entre gramáticas (castellana y artificial) muestran los patrones de sincronización hallados. De esta manera, planteamos analizar desde la perspectiva del análisis funcional de conectividad, posibles bases neuronales comunes al procesamiento de errores sintácticos (gramática natural) y combinatorios de naturaleza estadística (gramática artificial).

2. Método

Participantes

Participaron del experimento 15 adultos (9 mujeres, promedio de edad 26.4 ± 4.3 años; rango: 19-34.), con estudios terciarios en curso o completos, sin antecedentes de trastornos mentales, enfermedades neurológicas o psiquiátricas y que no consumían sustancias psicoactivas. Los sujetos participaron voluntariamente de los experimentos y prestaron su consentimiento informado por escrito, el cual fue previamente aprobado por el comité de ética del Instituto de Biología y Medicina Experimental (IBYME-CONICET).

Materiales

Gramática artificial

Se construyó una gramática artificial con un léxico de 17 palabras artificiales. Las palabras fueron fonotácticamente correctas, pero inexistentes en el idioma español, con una estructura de tipo CVCV (consonante, vocal, consonante, vocal). El léxico estuvo constituido por 3 categorías de palabras artificiales: categoría A: “bare”, “lane”, “fade”, “pefa”, “leda”; categoría B: “siru”, “soti”, “nomi”, “revu”, “roli”; categoría C: “pere”, “mene”, “tese”, “sele” y tres palabras de función: “bapa”, “ducu” y “nili”. Las categorías fueron definidas arbitrariamente, pero sus elementos compartían características formales para facilitar su identificación: los elementos de la categoría A sólo contenían las vocales “a” y “e”, los elementos de la categoría B sólo las vocales “o” y “u” y los elementos de la categoría C sólo la vocal “e”.

La gramática artificial admitía dos estructuras posibles para construir las secuencias: tipo 1: *bapa* - categoría A – categoría B – *ducu* – categoría A; y tipo 2: *bapa* – categoría A – categoría B – categoría C – *nili* – categoría A (Figura 1).

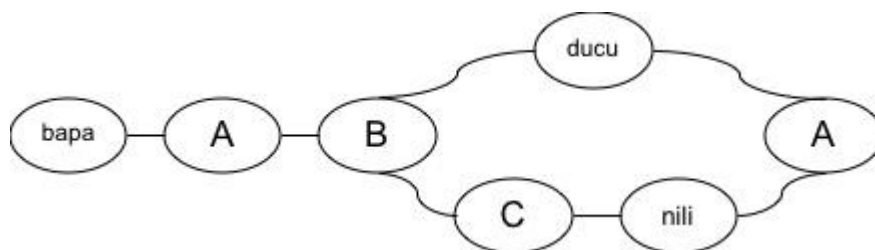


Figura 1. Estructura de la gramática artificial utilizada en el experimento. Las secuencias gramaticales se construyeron navegando el grafo de izquierda a derecha, agregando una palabra de cada categoría correspondiente.

Procedimiento

El experimento se realizó en una sola sesión, dividido en tres partes: entrenamiento y testeo de la tarea de gramática artificial y testeo de la gramática natural. Las tres partes estuvieron separadas por un intervalo de descanso de diez minutos.

La tarea de gramática artificial se dividió en una fase de entrenamiento por exposición pasiva y una fase de testeo. En el entrenamiento, se les explicó a los sujetos que verían oraciones en un lenguaje inventado, y que debían prestarles atención y responder a las preguntas que se les hicieran sobre ellas. A lo largo del entrenamiento, los sujetos debieron responder si un ítem específico había aparecido en la oración anterior (esta tarea se incluyó para asegurar que la atención de los sujetos estuviera efectivamente dirigida a las secuencias). Esta pregunta se realizó a intervalos aleatorios. El entrenamiento consistió en dos bloques de 45 ensayos cada uno, presentándose en total 90 secuencias de palabras artificiales construidas de acuerdo con las reglas de la gramática.

Concluido el entrenamiento, los sujetos continuaron con la fase de testeo, en la cual se les explicó que verían oraciones nuevas, algunas de ellas construidas de acuerdo con las reglas del lenguaje inventado y otras que violarían dichas reglas. Se les pidió que, al finalizar cada oración, respondieran presionando un botón si les había parecido correcta o incorrecta. La fase de test consistió en 2 bloques de 80 secuencias cada uno (con un breve receso intermedio), presentándose en total 160 secuencias, 80 construidas de acuerdo a las reglas de la gramática (gramaticales) y 80 conteniendo alguno de los siguientes tipos de violación (40 de cada uno): presentar la palabra artificial *nili* en lugar de *ducu* (y viceversa), o presentar una palabra artificial de la categoría B en lugar de la categoría A, al final de la oración (Tabla 1).

Tabla 1. Ejemplos de secuencias presentadas en la tarea de gramática artificial. Los estímulos subrayados y en negrita indican la posición de la violación en las secuencias no gramaticales.

Tipo	Secuencias gramaticales	Violaciones estructurales
(i)	<i>Bapa pefa soti ducu bare</i>	<i>Bapa pefa soti <u>nili</u> bare</i> <i>Bapa cane siru ducu <u>soti</u></i>
(ii)	<i>Bapa fadi revu tese nili lane</i>	<i>Bapa fadi revu tese <u>ducu</u> lane</i> <i>Bapa pefa soti pere nili <u>siru</u></i>

La proporción de secuencias gramaticales y violaciones fue la misma en cada uno de los bloques. A lo largo de esta fase se realizó el registro de actividad EEG de los sujetos, sincronizada con la aparición de los ítems erróneos en las violaciones estructurales y los ítems correspondientes en las secuencias gramaticales.

A lo largo de la tarea de gramática artificial, todas las secuencias fueron presentadas de a una palabra por vez en un monitor de PC, con una duración de 500 ms y un intervalo entre estímulos de 600 ms. Luego de la presentación de cada secuencia, se introdujo una pausa de 2 segundos antes de la presentación de la secuencia siguiente.

Una vez finalizada la tarea de gramática artificial, los participantes realizaron una segunda versión del testeó con oraciones de su lengua materna. Una vez más, se les dio la instrucción de clasificar las oraciones como correctas o incorrectas. Se presentaron 80 oraciones experimentales y 80 oraciones de relleno (fillers). La mitad de las oraciones experimentales eran gramaticales (e.g.: “*La medidora le permitió a las partes que expresaran sus reclamos*”) y la mitad contenían una violación de categoría que consistió en agregar erróneamente una preposición luego del verbo (por ejemplo: “*La decoradora le recomendó a los jóvenes combinar **de** los colores.*”). Asimismo, la mitad de las oraciones de relleno fueron gramaticales, y la otra mitad contenía una conjugación verbal incorrecta (por ejemplo: “*La radio le prohibió a sus locutoras que **entregar** las facturas.*”) Las oraciones de relleno fueron incluidas para aumentar la dificultad de la tarea e impedir que los sujetos se concentraran sólo en una parte específica de las oraciones para resolverla. Al igual que en la tarea de gramática artificial, no se proporcionó feedback a los sujetos sobre su desempeño, y el registro EEG se sincronizó con la aparición de la palabra sintácticamente errónea en las violaciones sintácticas, y la palabra correspondiente en las oraciones gramaticales.

Materiales

Los participantes de los tres grupos controles y los niños con dislexia fueron evaluados en dos sesiones. En la primera realizaron una tarea de lectura en voz alta y de comprensión de textos utilizada en una investigación previa (Fumagalli, Barreyro & Jaichenco, 2017). Los niños del grupo control de 3º grado y los pacientes SE y MI leyeron un texto de 141 palabras compuestas por 295 sílabas del libro *Dame la palabra 3* (Leibovich, 2012); los alumnos del grupo control de 5º grado y los pacientes SF, VR, CC y GC fueron evaluados con un texto de 128 palabras y un total de 265 sílabas extraído del libro *Letras en red 5* (Salussoglia, 2008) y los niños del grupo control de 7º grado y el paciente MN leyeron un texto de 212 palabras y 434 sílabas extraído de *Ciencias Naturales I ES/ 7 EP* (Tomsin, 2013). Luego de la lectura debían responder cuatro preguntas que evaluaban la macroestructura del texto. La lectura en voz alta fue registrada digitalmente para su posterior transcripción. Para el análisis de los datos se calculó el tiempo promedio de lectura de palabras medido en milisegundos, el porcentaje de palabras leídas de manera correcta y el puntaje

correspondiente a la tarea de comprensión lectora. Para la puntuación en comprensión se otorgaron 2 puntos si las respuestas eran completas, 1 punto si eran incompletas y 0 si eran incorrectas o no respondían.

En la segunda sesión, todos los participantes de los grupos controles y los niños con dislexia realizaron una tarea de lectura silente y comprensión para la cual se seleccionó un texto expositivo para cada nivel. Los niños del grupo control de 3° grado y SE y MI leyeron un texto de 152 palabras y un total de 257 sílabas extraído de Ta Te Ti Amigos para mí 3 (Repetti, Hurrell, & Briones, 2008). El grupo control de 5° grado y los pacientes SF, VR, CC y GC fueron evaluados con un texto de 238 palabras y 430 sílabas extraído de Ciencias Naturales 5 en construcción (Bosco, 2012). Los alumnos del grupo control de 7° grado y el paciente MN con un texto de 281 palabras y 599 sílabas extraído de Ciencias Naturales I ES/ 7EP (Mosquera, 2013). Luego de la lectura del material respondieron cuatro preguntas que evaluaban la macroestructura con el texto presente. Para la puntuación de la tarea de comprensión y para calcular el tiempo promedio de lectura se siguieron los mismos criterios que en la tarea de lectura en voz alta.

Registro Electroencefalográfico

La actividad electroencefalográfica se registro mediante un equipo AKONIC BIOCOP y un gorro electro-Cap de 19 electrodos distribuidos de acuerdo al sistema internacional 10/20. La impedancia de los canales se mantuvo bajo 10 k Ω . La señal de EEG fue digitalizada a 256 Hz y se aplicó un filtro digital entre los 0.5 y los 30 Hz. Para cada tarea experimental se sincronizó el registro EEG con la aparición de los estímulos críticos. El análisis de los potenciales cerebrales relacionados con eventos se realizó mediante el software EEGLAB (Delorme y Makeig, 2004). Se determinó una longitud de época de 2 segundos incluyendo una línea de base de 200 ms previos al inicio de la época. Los artefactos oculares se detectaron y removieron del trazado a través del algoritmo ADJUST (Mognon et al., 2011), basado en el análisis de componentes independientes de la señal (Independent component analysis – ICA). Las épocas que contenían otros tipos de artefactos fueron detectadas por inspección visual y eliminadas manualmente. Solamente aquellos ensayos en los que los sujetos respondieron correctamente fueron incluidos en el análisis.

Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico de los potenciales cerebrales relacionados con eventos, se calculó el voltaje promedio dentro las ventanas temporales de interés en cada experimento, determinadas a partir de la inspección visual y de resultados publicados previamente. El voltaje promedio se analizó mediante ANOVAS de medidas repetidas, que incluyeron en todos los casos los siguientes factores intrasujeto: Región del electrodo (anterior, central, posterior) y Lateralidad del Electrodo (cinco regiones de interés de izquierda a derecha: 1 – electrodos F7, T3 y T5, 2 – electrodos F3, C3 y P3, 3 – electrodos Fz, Cz y Pz, 4 – electrodos F4, C4 y P4 y 5 – electrodos F8, T6 y P8. Se aplicó la corrección Greenhouse-Geisser para las violaciones de

esfericidad, y el ajuste de Bonferroni para las comparaciones post hoc. El tamaño de efecto se estimó mediante el coeficiente eta cuadrado parcial (η^2_p). El análisis estadístico de los datos se llevó a cabo mediante el software SPSS v15.

Análisis de conectividad funcional

El grado de sincronización entre electrodos se analizó mediante Phase Locking Value (PLV), el cual considera el valor absoluto del promedio en la diferencia de fase entre dos bandas de frecuencia estrechas. El valor se expresa como un vector complejo de valor máximo igual a 1 (Aydore et al. 2013). Durante el estudio de actividad evocada, un estímulo específico resetea la fase de los osciladores neuronales, de forma tal que que las señales conectadas en un intervalo de tiempo determinado mostrarán diferencias de fase estables en el tiempo de acuerdo a la siguiente fórmula (Bruna et al. 2018):

$$PLV_{i,j}(t) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N e^{-i(\varphi_i(t,n) - \varphi_j(t,n))} \right|$$

N es el número de ensayos y $\varphi(t, n)$ la fase instantánea para la señal i en el ensayo n al tiempo t . El valor de PLV varía entre 0 (diferencia de fase aleatoria entre las señales) y 1 (diferencia de fase constante entre señales). Para computar esta medida empleamos el Brainstorm Matlab Toolbox (Tadel et al. 2011). Con el objeto de estudiar diferencias de conectividad durante el procesamiento de oraciones gramaticales y no gramaticales en ambos tipos de gramáticas (natural y artificial), cuantificamos la medida de PLV en las ventanas temporales correspondientes a los potenciales evocados analizados en Tabullo et al. (2013), i.e 200-400 ms (P300); 450-550 ms (N400) y 600-1000 ms (P600), para las bandas de frecuencia (theta, alfa y beta), reportando los valores de PLV entre electrodos, mayores a 0,8. A su vez, las matrices de conectividad (un valor por par de electrodos) se analizaron estadísticamente por medio de un test de T pareado, corrigiendo por comparaciones múltiples por medio de la corrección FDR (Benjamini & Hochberg, 1995) con un umbral de $p < 0,05$ en los valores de sincronización.

3. Resultados

Comportamentales

El porcentaje de aciertos de los sujetos en la tarea de gramática artificial fue superior al azar, (Promedio = $65,32 \pm 8,16$ %; $T(14) = 7,27$, $p < 0,001$), lo cual indica que aprendieron exitosamente las regularidades estructurales de las secuencias. Por otra parte, su rendimiento en la tarea de gramática natural (Promedio = $97,22 \pm 3,73$) fue significativamente superior ($T(14) = 48,97$, $p < 0,001$), lo cual es esperable dado

que su exposición a la gramática artificial (aproximadamente 20 minutos) fue muy breve comparada con la experiencia previa con su lengua materna.

Potenciales cerebrales relacionados con eventos

El análisis de los potenciales cerebrales relacionados con eventos ha sido presentado en detalle en Tabullo et al. (2013). Brevemente, las violaciones sintácticas generaron un componente de tipo P300 (para una revisión véase 2007), en la gramática natural pero no en la gramática artificial (Figura 2). En ventanas más tardías, el procesamiento de anomalías estructurales en la gramática natural y artificial elicó un patrón de actividad equivalente: las violaciones gramaticales generaron una negatividad posterior de tipo N400 (para una revisión, véase Kutas et al. 2006; Lau et al. 2008,), seguida por un componente P600 (Gouvea et al. 2010; Kuperberg, 2007; Kutas et al., 2006 para revisiones) ampliamente distribuido, sin observarse diferencias significativas entre gramáticas para ambos efectos (Figura 2).

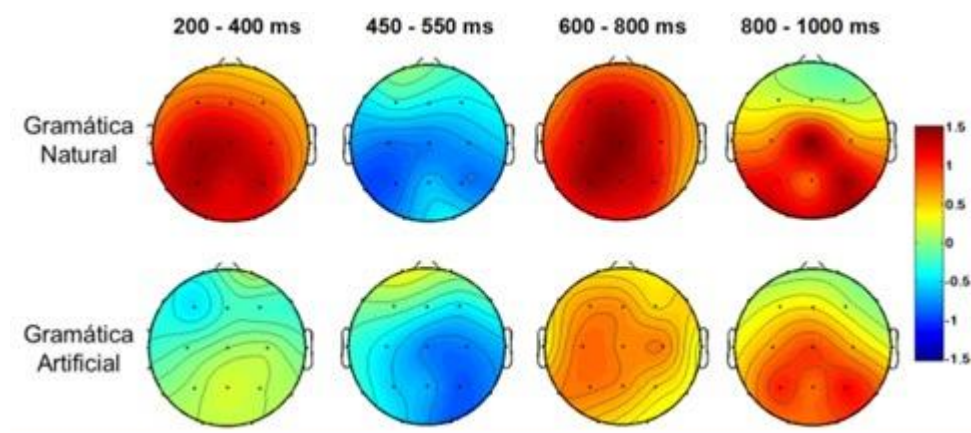


Figura 2. Topografías de la onda de diferencia (violación – gramatical) en las 4 ventanas temporales analizadas, para las tareas de gramática natural y artificial (Tabullo et al. 2013).

Conectividad funcional

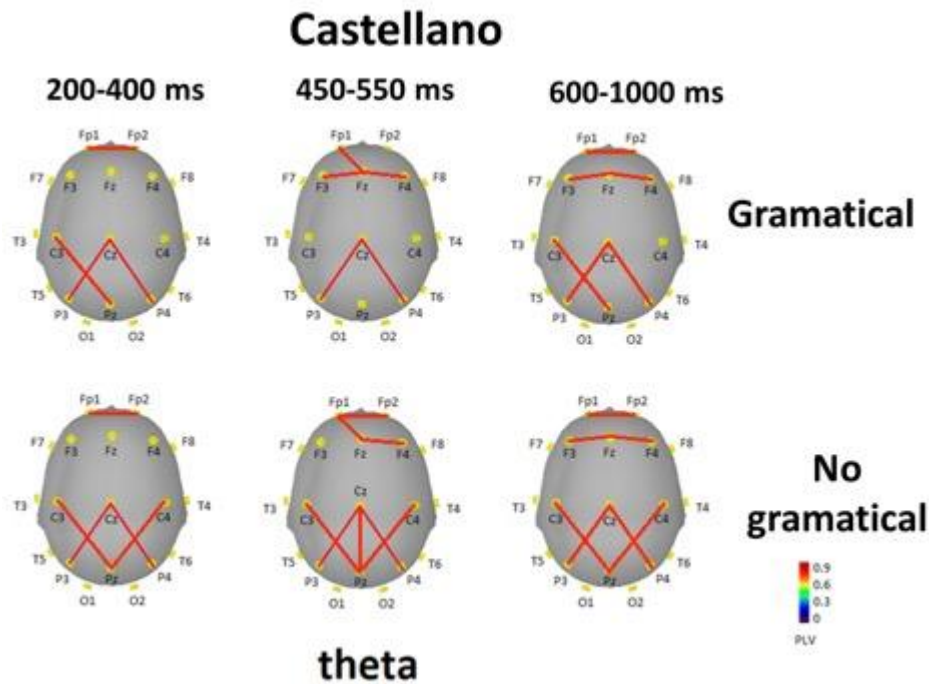
Banda theta (gramática castellana)

La Figura 3 (panel superior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática castellana. Para la condición gramatical, en la ventana temprana (200-400 ms), se observaron valores de sincronización por encima de 0,8 entre electrodos prefrontales (Fp1 y Fp2) y entre centrales (C3, Cz) y parietales (P3, Pz, P4). El mismo patrón de conectividad se observó para la condición No gramatical, hallándose una sincronización adicional entre C3 y Pz. Sin embargo, a nivel estadístico, el análisis no mostró diferencias significativas entre ambas condiciones (Gramatical vs. No gramatical). En la ventana media (450-550 ms), condición gramatical, la sincronización superó el nivel de 0,8 entre Fp1 y Fz, y entre los electrodos frontales

<http://www.revneuropsi.com.ar>

ISSN: 1668-5415

F3, Fz y F4. Adicionalmente se observó sincronización entre Cz y P3/P4. Para la condición No gramatical, se observó un patrón similar al anterior, con valores de PLV de al menos 0,8 entre Fp1 y Fp2, y Fp1, Fz y F4. A nivel centro-parietal, se observó una elevada sincronización entre Cz y P3/Pz/P4. Adicionalmente, Pz se sincronizó con C3/C4. No se hallaron diferencias significativas entre condiciones (Gramatical vs. No gramatical). Por último, en la ventana tardía (600-1000 ms), condición Gramatical, se halló un patrón similar al hallado en la ventana de 200-400 ms, agregándose solamente una conectividad elevada entre los electrodos F3/Fz/F4. Lo mismo pudo observarse para la condición No gramatical, en la cual se halló el mismo patrón que en la ventana temprana, con el agregado de una conectividad elevada entre F3/Fz/F4. Ambas condiciones (Gramatical vs. No gramatical) no difirieron estadísticamente entre sí.



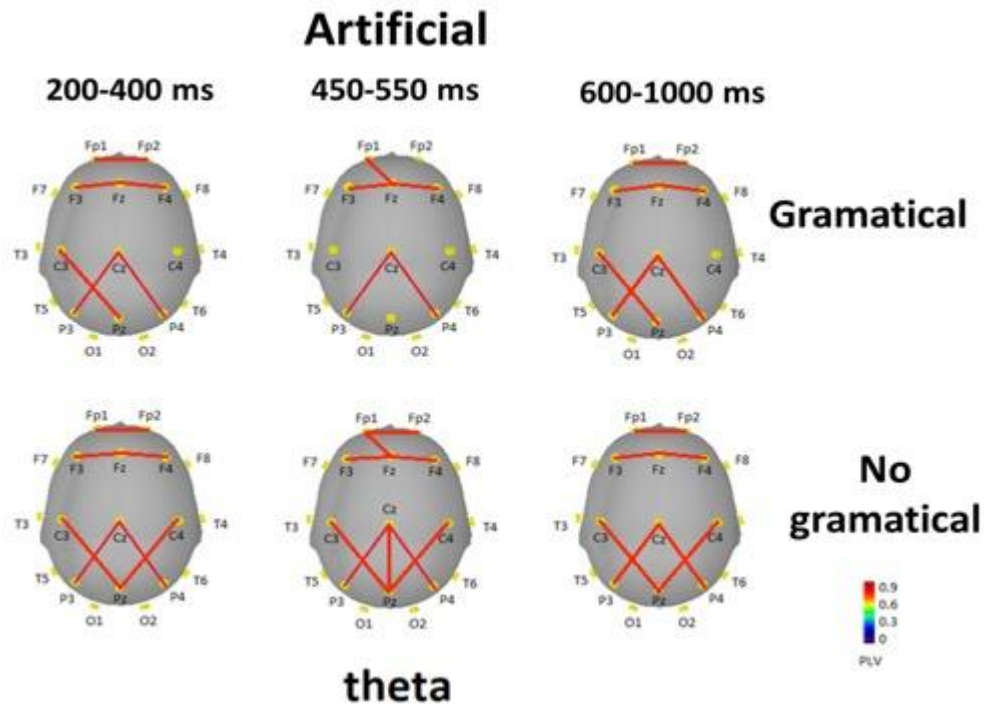


Figura 3. Resultados de PLV para la banda theta.

Banda theta (gramática artificial)

La Figura 3 (panel inferior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática artificial. En la ventana temprana, condición Gramatical, se halló un patrón casi idéntico al hallado para la misma ventana y condición en gramática castellana, agregándose tan sólo una elevada conectividad entre los electrodos F3/Fz/F4. Lo mismo pudo observarse para la condición No gramatical, en la cual se halló un patrón casi idéntico al hallado para la misma ventana y condición en gramática castellana, con el agregado de una conectividad elevada entre F3/Fz/F4. No se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre ambas condiciones (Gramatical vs. No gramatical) en la gramática artificial. En las ventanas media y tardía, el patrón de conectividad hallado fue idéntico al observado para las correspondientes ventanas y condiciones en gramática castellana, sin hallarse diferencias significativas entre condiciones (Gramatical vs. No Gramatical) en ninguna de las dos ventanas.

Banda alfa (gramática castellana)

La Figura 4 (panel superior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática castellana. Para la condición gramatical, ventana temprana, se halló una sincronización elevada entre Fp1/Fp2, a la vez que entre F3/Fz/F4. A nivel centro-parietal, se halló una alta sincronización entre Cz y P4. En la condición No gramatical, el patrón de conectividad fue idéntico al anterior, con el agregado del par

Cz/P3. No se hallaron diferencias significativas entre condiciones (Gramatical vs. No gramatical). En la ventana media, condición gramatical, el patrón de conectividad observado fue similar al de la ventana anterior (condición gramatical), con el agregado de elevada sincronización entre Fp1/Fz a nivel frontal, y Cz/P3 a nivel centro-parietal. De manera similar, la condición No gramatical mostró un patrón idéntico al de la ventana temprana (condición No gramatical), con el agregado de elevada sincronización entre Fp1/Fz y Cz/Pz. No hubo diferencias significativas entre condiciones (gramatical vs. No gramatical). Finalmente, en la ventana más tardía, condición gramatical, el patrón de conectividad hallado a nivel frontal fue idéntico al hallado en la ventana temprana, mientras que a nivel centro-parietal la sincronización se observó entre Cz y P3. Para la condición No gramatical, el patrón de conectividad fue idéntico al hallado en la ventana temprana (condición No gramatical). A nivel centro-parietal, se halló una diferencia significativa ((t-score = 3.63, $p < 0,05$) en el grado de conectividad observado entre condiciones (Gramatical vs No gramatical) para el par Cz/P4.

Banda alfa (gramática artificial)

La Figura 4 (panel inferior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática artificial. En la ventana temprana, condición gramatical, se halló un patrón de conectividad de tipo frontal, el cual fue idéntico al hallado en la misma ventana y condición de la gramática castellana. En la condición No gramatical, la distribución de conectividad tanto a nivel frontal como centro-parietal fue idéntico al hallado en la misma ventana y condición de gramática castellana. En las ventanas media y tardía, el patrón de conectividad hallado replicó al hallado en la ventana y condición experimental equivalente de gramática castellana. Al igual que en la gramática castellana, en la ventana tardía se halló una diferencia significativa entre condiciones en el grado de sincronización del par Cz/P4 (t-score = 3.64, $p < 0,05$).

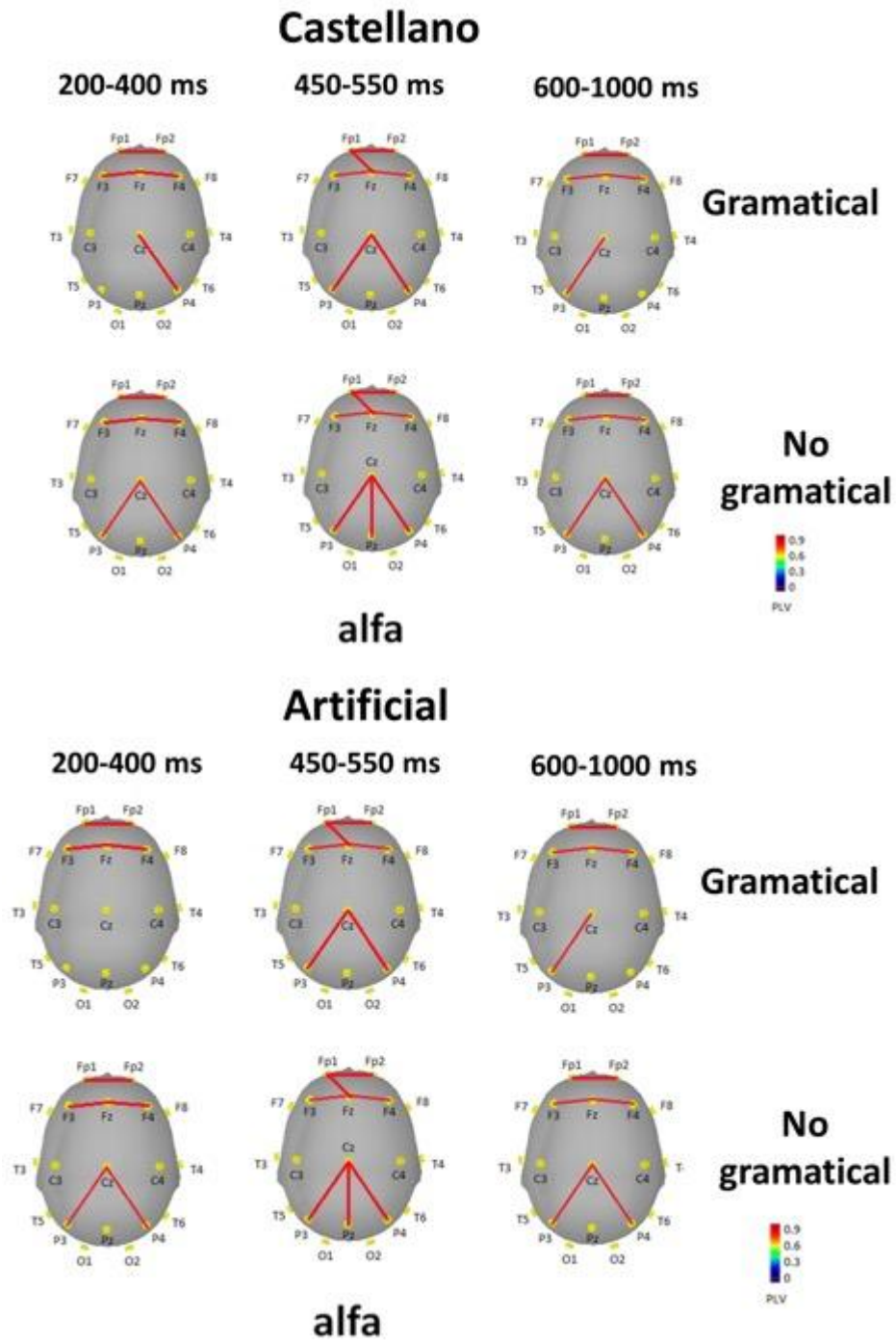


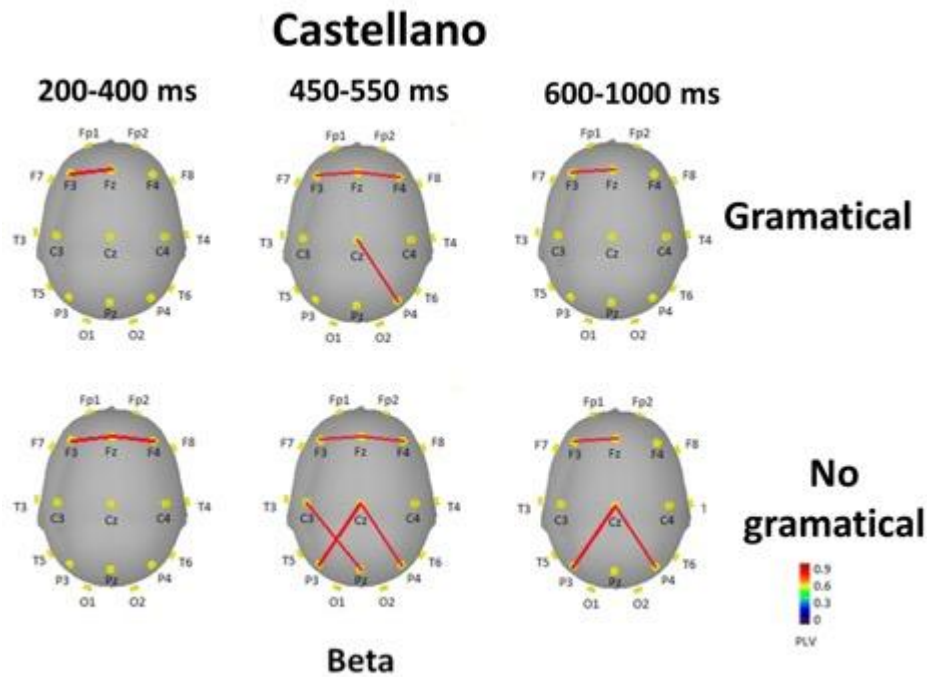
Figura 4. Resultados de PLV para la banda alfa.

Banda beta (gramática castellana)

La Figura 5 (panel superior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática castellana. En la ventana temprana, condición gramatical, se observó una sincronización alta sólo en el par F3/Fz. En el caso de la condición No Gramatical, se observó sincronización en el mismo par anterior, y en F4/Fz. No se hallaron diferencias significativas entre condiciones.

En la ventana media, condición gramatical, se observó sincronización elevada entre F3/Fz/F4 a nivel frontal, y en el par Cz/P4 a nivel centro-parietal. En la condición No gramatical, se halló el mismo patrón que en la condición gramatical, con el agregado de C3/Pz y Cz/P3. Sin embargo, a nivel estadístico, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Finalmente, en la ventana tardía, condición gramatical, se halló la misma sincronización P3/Pz hallada en la ventana temprana, mientras que en la condición No gramatical, se agregó a esta sincronización frontal, una centroparietal en los pares Cz/P3 y Cz/P4. A nivel estadístico, la sincronización Cz/P4 fue significativamente más alta en la condición No gramatical respecto de la Gramatical (t-score = 4.02, p<0,05).



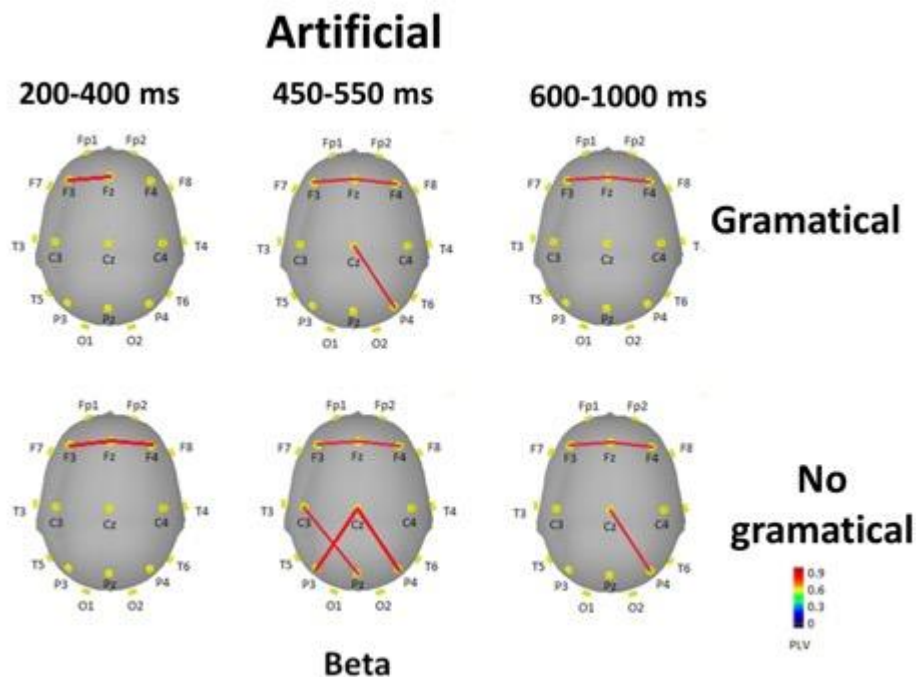


Figura 5. Resultados de PLV para la banda beta.

Banda beta (gramática artificial)

La Figura 5 (panel inferior), muestra el patrón de resultados obtenidos para la gramática artificial. En las ventanas temprana y tardía, el patrón de conectividad hallado para las condiciones gramatical y No gramatical fue idéntico al observado en las ventanas y condiciones equivalentes de gramática castellana. En la ventana tardía, condición gramatical, mostró una elevada sincronización entre los electrodos F3/Fz/F4. En la condición No gramatical se halló este mismo patrón de conectividad frontal, y una elevada sincronización en el par Cz/P4, el cual fue significativamente más elevado en esta condición vs. Gramatical ($t\text{-score} = 4.08, p < 0.05$).

4. Discusión

Los resultados comportamentales y de potenciales evocados han sido extensamente analizados en Tabullo et al. (2013). Brevemente, desde el punto de vista comportamental los participantes adquirieron un conocimiento significativo de la gramática artificial, siendo capaces de desarrollar expectativas acerca de la

estructura de las secuencias de estímulos, desempeñándose por sobre el nivel de azar en el testeo.

Potenciales evocados

El análisis de los potenciales cerebrales mostró que el procesamiento de anomalías estructurales en la gramática natural y artificial fue diferente en una ventana temprana (200-400 ms), teniendo un patrón de actividad similar en etapas medias (450-550 ms) y tardías (600-1000 ms). En la ventana temprana, las violaciones sintácticas generaron un componente P300 en la gramática natural, pero no en la gramática artificial. La aparición de este potencial podría encontrarse relacionado con que la inserción de una preposición luego de la posición del verbo hace que la estructura de la oración sea inválida (“La guía les recomendó a los turistas que observaran *del* paisaje.”), aunque este error podría ser reparado si se continuara con un sujeto para la cláusula subordinada (“La guía les recomendó a los turistas que observaran *del* paisaje *los árboles*.”). Por tanto, en el momento en que la preposición aparece, los participantes podrían llegar a dudar si la oración constituye una violación o una forma poco frecuente, pero sintácticamente válida. Esta posibilidad es congruente con los resultados de Leone-Fernández et al. (2012) en el que se reportó un P300 seguido de un P600 para oraciones que combinaban el verbo “estar” con un evento (“la fiesta *está* en la cocina”), las cuales fueron consideradas extrañas, pero aceptables.

En una ventana intermedia, las violaciones gramaticales generaron una negatividad centro-posterior (N400), sin observarse diferencias entre ambas gramáticas. Diversos estudios han hallado este componente en ausencia de errores semánticos (Sanders et al., 2002; McLaughlin et al., 2004; Mueller et al., 2005; 2008). Esto ha llevado a interpretar que la aparición del N400 en ausencia de errores semánticos estaría reflejando la violación de una expectativa a nivel lexical (Mueller et al. 2008), basada en la sensibilidad a los patrones de co-ocurrencias observados en gramática artificial y natural. En el presente experimento, es posible que los participantes desarrollaran asociaciones predictivas entre los elementos de la gramática artificial, anticipando por tanto la aparición de determinados elementos en ciertos contextos. Estas expectativas no se cumplirían al presentarse secuencias no gramaticales, generándose así un potencial N400. En el caso de la gramática natural, es posible que el contexto oracional generara una fuerte expectativa de una palabra de función específica (por ejemplo, el artículo “los” en la oración “*La decoradora le recomendó a los jóvenes combinar los colores*.”), de forma tal que al presentar una palabra anómala, la violación de la predicción a nivel lexical generase un N400.

En la ventana tardía, la aparición del potencial P600 observado luego de anomalías estructurales en ambas gramáticas puede ser interpretado como un reflejo del costo de integración a nivel combinatorio entre un elemento (palabra o no palabra) y el contexto oracional previo (Bahlmann et al. 2006; Kaan, 2007, 2009; Kaan et al., 2000; Hagoort, 2009), tanto en el caso de la gramática natural como en la artificial. La comprensión de oraciones dependería de mecanismos predictivos en los que la información lexical, semántica y sintáctica de las palabras percibidas se combina para

anticipar las características de las probables palabras siguientes (Gibson, 1998; Hagoort, 2009; DeLong et al., 2005; van Berkum et al., 2005). Al preactivarse las características de las continuaciones más probables de la oración, se facilita el procesamiento de las palabras futuras, permitiendo que su integración con el contexto previo se lleve a cabo en la escala de tiempo requerida por la velocidad del lenguaje oral. Cuando el input lingüístico no se corresponde con las expectativas generadas, esta integración se hace más lenta y difícil, requiriendo el reclutamiento de recursos neurales adicionales para su procesamiento. El P600 sería el reflejo del incremento en el costo de integración combinatoria generado por el incumplimiento de las predicciones basadas en el contexto previo. Esta interpretación es aplicable a todas las instancias observadas del P600 (Kaan et al., 2000) incluidas las violaciones presentadas en nuestro estudio. A lo largo del entrenamiento en la gramática artificial los sujetos adquieren asociaciones predictivas entre los elementos de las diferentes categorías, a partir de la exposición a los patrones de co-ocurrencias dentro de las secuencias. Estas predicciones se verían incumplidas en el caso de las violaciones gramaticales presentadas durante el test, y el reclutamiento de recursos neurales adicionales para procesar los estímulos inesperados se habría visto reflejado en el potencial P600.

Conectividad funcional

El presente trabajo tuvo como objetivo central realizar un análisis de conectividad funcional de los datos reportados por Tabullo et al. (2013), con el propósito de estudiar los patrones de sincronización por frecuencias que subyacen a la generación de los potenciales tempranos, medios y tardíos descritos en dicho estudio. Este análisis permitió: i) estudiar cuál es la sincronización entre regiones que caracteriza al P300, N400 y P600 elicitados por el procesamiento de oraciones gramaticales y no gramaticales tanto en castellano como en gramática artificial; ii) analizar similitudes y/o diferencias entre gramáticas (castellana y artificial) en los patrones de sincronización hallados. Los resultados mostraron tres puntos principales a destacar que se exponen a continuación. En primer lugar, en las tres bandas de frecuencias, y las tres ventanas temporales analizadas, se observó una sincronización de fase entre electrodos frontales, y entre electrodos centrales y parietales. Este esquema frontal y centro-parietal se observó tanto durante el procesamiento de gramática castellana como artificial, en oraciones gramaticales y no gramaticales. Por tanto, los resultados muestran que el procesamiento de ambas gramáticas requiere de la actividad sincronizada de regiones frontales y centro-parietales en su conjunto. Esta actividad sincronizada involucra las tres bandas de frecuencia analizadas. La actividad de cada banda ha mostrado, en estudios previos, relacionarse con procesos cognitivos distintos de acuerdo al rango de frecuencias considerado.

En el caso de theta, se ha observado que el aumento de actividad en dicha banda se relaciona con procesos de codificación y acceso lexical (Arnal et al. 2011; Bastianseen et al. 2005; Krause et al. 2006), al igual que con procesos activos de mantenimiento en memoria de trabajo de información relevante para la ejecución de

la tarea (Klimesch et al., 2001; Guderian & Duzel, 2005; Cashdollar et al., 2009; von Stein et al. 2000, Siegel et al., 2009), como así también en la toma de decisiones basada en el reconocimiento de estímulos particulares (Jacobs et al. 2006). En el presente experimento, la actividad sincronizada observada en regiones frontales y centro-parietales en theta podría por tanto estar relacionada con que la ejecución de la tarea requería de parte de los individuos, el reconocimiento de los ítems léxicos (palabras o no palabras), y del acceso y mantenimiento on-line de las reglas combinatorias o gramaticales entrenadas (gramática artificial) y de la gramática castellana.

La banda alfa también se ha descrito en relación con acceso léxico semántico (Bastiaansen et al., 2005; Klimesch et al., 1997), memoria de trabajo (Palva & Palva, 2007). Más recientemente, se ha propuesto que la actividad en alfa se encontraría relacionada con procesos de unificación tanto a nivel semántico como sintáctico (Nietsche et al., 2016). En el presente caso, por tanto, interpretamos la actividad sincronizada en alfa en la región frontal y centro-parietal, como índice del acceso a los ítems léxicos involucrados y a la ejecución de procesos de unificación semántico/sintáctico (gramática castellana) o puramente sintáctico/combinatorios (gramática artificial).

Finalmente, recientemente se ha propuesto que el aumento de sincronización en la banda beta se encontraría relacionada con el mantenimiento activo de información relevante de un set cognitivo específico (Engel & Fries 2010), a procesos de mantenimiento de atención y a la violación de expectativas respecto al set cognitivo activo (Weiss & Mueller 2012), así como también a procesos de unificación (Glen Lewis et al. 2015; Nietsche et al., 2016; Weiss & Mueller 2012). Proponemos, por tanto, que en el presente experimento, el aumento de sincronización observado en beta se relacionaría con el mantenimiento activo de la información léxico sintáctica/combinatoria relevante para la ejecución del juicio de gramaticalidad que los sujetos debían realizar, así como a los procesos de unificación necesarios para hacerlo.

En segundo término es de destacar que el patrón de conectividad descrito en el punto anterior no difirió entre tipos de gramática (castellana vs. artificial). Este resultado, junto con el descrito por Tabullo et al. (2013), respecto de los potenciales evocados obtenidos en ambas gramáticas, señalan que no sólo los procesos cognitivos involucrados en las dos gramáticas son equiparables, sino también que el patrón topográfico de actividad sincronizada es equivalente en ambos casos también. Estos resultados apuntan a señalar que el procesamiento gramatical de un lenguaje natural (castellano en este caso), estaría basado en el análisis de relaciones combinatorias entre elementos, tal como los entrenados en la gramática artificial.

En tercer lugar, el procesamiento de oraciones no gramaticales vs. gramaticales generó en la ventana tardía un aumento significativo de sincronización entre la región central y parietal derecha tanto para la banda alfa como beta. Tal como fuera descrito en el punto (i), la actividad en ambas bandas ha sido recientemente relacionada funcionalmente con procesos de unificación de elementos (alfa y beta), y

con procesos de violación de expectativas del set cognitivo relevante (beta). Por tanto, interpretamos el aumento de sincronización significativo entre Cz y P4 en las oraciones no gramaticales como consecuencia del reclutamiento de recursos neuronales adicionales durante el proceso de intento de unificación de un ítem léxico aparecido en una posición inesperada e incorrecta. Este tipo de evento, a su vez generaría una violación de expectativa que induciría un aumento de actividad sincronizada en beta entre la región central y parietal.

En conclusión, los resultados aportados en el presente trabajo, mediante el análisis de conectividad funcional por Phase Locking Value, muestran que el patrón topográfico de actividad sincronizada entre regiones, no difieren entre tipos de gramáticas, apuntando a que los procesos de análisis sintáctico en gramática natural podrían estar relacionados con el análisis de posibilidades combinatorias entre elementos léxicos, en forma similar a lo entrenado estadísticamente en gramática artificial.

Bibliografía

- Arnal, L. H., Wyart, V., & Giraud, A. L. (2011). Transition in neural oscillations reflect prediction errors generated in audiovisual speech. *Nat. Neurosci.* 14, 797–801.
- Glen Lewis, A., Wang, L., & Bastiaansen, M. (2015) Fast oscillatory dynamics during language comprehension: Unification versus maintenance and prediction? *Brain y Language* 148, 51–63.
- Bastiaansen, M. van der Linden, M., Ter Keurs, M., Dijkstra, T., & Hagoort, P. (2005). Theta responses are involved in lexico semantic retrieval during language processing. *J. Cogn. Neurosci.* 17, 530–541.
- Cashdollar N., Malecki U., Rugg-Gunn F.J., Duncan J.S., Lavie N., & Duzel E. (2009) Hippocampus-dependent and -independent theta networks of active maintenance. *Proc Natl Acad Sci*, 106: 20493-20498.
- Christiansen, M., Conway, C., & Onnis, L. (2012). Similar neural correlates for language and sequential learning: Evidence from event-related brain potentials. *Language and Cognitive Processes*, 27, 231-256.
- Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations – Signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology*, 20, 156–165.
- Federmeier, K.D., & Kutas, M. (1999). A rose by any other name: long-term memory structure and sentence processing. *Journal of Memory and Language*, 41, 469-495.
- Felser, C., Clahsen, H., & Munte, T. F. (2003). Storage and integration in the processing of filler-gap dependencies: An ERP study of topicalization and wh-movement in German. *Brain and Language*, 87, 345-354.

- Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., & Friederici, A. D. (2002). Separating syntactic memory costs and syntactic integration costs during parsing: The processing of German wh-questions. *Journal of Memory and Language*, 47, 250-272.
- Gomez, R. L., Gerken, L. & Schvaneveldt, R. W. (2000). The basis of transfer in artificial grammar learning. *Memory y Cognition*, 28, 253-263.
- Guderian S., & Duzel E. (2005) Induced theta oscillations mediate large scale synchrony with mediotemporal areas during recollection in humans. *Hippocampus*, 15:901-912.
- Gunter, T. C., Stowe, L. A., & Mulder, G. (1997). When syntax meets semantics. *Psychophysiology*, 34, 600-676.
- Hagoort, P., Brown, C. M., & Groothusen, J. (1993). The syntactic positive shift (SPS) as an ERP measure of syntactic processing. *Language and Cognitive Processes*, 8, 439-484.
- Hagoort, P., Brown, C. M., & Osterhout, L. (1999). The neural architecture of syntactic processing. En C. M. Brown y P. Hagoort (Eds.), *Neurocognition of language* (pp. 273-316). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Jacobs, J., Hwang, G., Curran, T., & Kahana, M.J. (2006) EEG oscillations and recognition memory: theta correlates of memory retrieval and decision making. *Neuroimage*, 32, 978-987.
- Kaan, E., & Swaab, T. Y. (2003). Electrophysiological evidence for serial sentence processing: A comparison between non-preferred and ungrammatical continuations. *Cognitive Brain Research*, 3, 17, 621-635.
- Kaan, E., Harris, A., Gibson, E., & Holcomb, P. (2000). The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and Cognitive Processes*, 15, 159-201.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Yonelinas, A., Kroll, N.E., Lazzara, M., Rohm, D., & Gruber, W. (2001) Theta synchronization during episodic retrieval: neural correlates of conscious awareness. *Brain Res Cogn Brain Res*, 12:33-38.
- Klimesch, W., Doppelmayr, M., Pachinger, T., & Russegger, H. (1997). Event-related desynchronization in the alpha band and the processing of semantic information. *Brain Res*, 6, 83-94.
- Krause, C. M., Gronholm, P., Leinonen, A., Laine, M., Sakkinen, A. L., & Soderholm, C. (2006). Modality matters: the effects of stimulus modality on the 4- to 30-Hz brain electric oscillations during a lexical decision task. *Brain Res*, 1110, 182-192.
- Kutas, M. & Federmeier, K.D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(12), 463-470.
- Kutas, M., & Hillyard, S.A. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203-205.
- Kutas, M., & Hillyard, S.A. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, 307(5947), 161-163.
- Munte, T. F., Matzke, M., & Johannes, S. (1997). Brain activity associated with syntactic incongruencies in words and pseudo-words. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9, 318-329.

- Neville, H., Nicol, J., Barss, A., Forster, K. I., & Garrett, M. I. (1991). Syntactically-based sentence processing classes: Evidence from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 151-165.
- Nietsche Lam, H.L., Schoffelen, J.M., Uddén, J., Hultén, A., & Hagoort, P. (2016) Neural activity during sentence processing as reflected in theta, alpha, beta, and gamma oscillations. *NeuroImage* 142 43–54.
- Osterhout, L., & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31, 785-806.
- Osterhout, L., Holcomb, P. J., & Swinney, D. A. (1994). Brain potentials elicited by garden-path sentences: Evidence of the application of verb information during parsing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 20, 786-803.
- Palva, S. & Palva, J.M. (2007) New vistas for alpha-frequency band oscillations. *Trends Neurosci*, 30:150-158.
- Peña, M., Bonnatti, L., Nespors, M., & Mehler, J. (2002). Signal-driven computations in speech processing. *Science*, 298, 604-607.
- Perruchet, P., & Pacteau, C. (1990). Synthetic grammar learning: Implicit rule abstraction or explicit fragmentary knowledge? *Journal of Experimental Psychology: General*, 119, 264–275.
- Petersson, K. M., Folia, V., & Hagoort, P. (2012). What artificial grammar learning reveals about the neurobiology of syntax. *Brain and Language*, 120, 83-95. doi:10.1016/j.bandl.2010.08.003.
- Petersson, K. M., Forkstam, C., & Ingvar, M. (2004). Artificial syntactic violations activate Broca's region. *Cognitive Science*, 28(3), 383-407. doi:10.1207/s15516709cog2803
- Reber, A.S. (1967). Implicit learning of artificial grammars. *Journal of Verbal Learning and Behavior*, 6, 855-863.
- Redington, M., & Chater, N. (1996). Transfer in artificial grammar learning: A re-evaluation. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 2, 123–138.
- Rugg, M.D. (1990). Event-related brain potentials dissociate repetition effects of high- and low frequency words. *Memory and Cognition*, 18(4), 367-379.
- Saffran, J.R. (2001). Words in a sea of sounds: The output of infant statistical learning. *Cognition*, 81, 149-169.
- Saffran, J. R. (2002). Constraints on statistical language learning. *Journal of Memory and Language*, 47, 172-196.
- Siegel, M., Warden, M.R., & Miller, E.K. (2009) Phase-dependent neuronal coding of objects in short-term memory. *Proc Natl Acad Sci* .106 (50) 21341-21346; <https://doi.org/10.1073/pnas.0908193106>
- Tabullo, A.; Sevilla, Y.; Segura, E.; Yorrio, A.; Zanutto, B.S.; & Wainseboim, A.J. (2013) An ERP study of structural anomalies in native and semantic free artificial grammar: evidence for shared processing mechanisms. *Brain Research* 1527: 149-160.

Thompson, S. & Newport, E. (2007). Statistical learning of syntax: The role of transitional probability. *Language Learning and Development*, 3, 1-42.

Van Berkum, J. J. A. (2009). Does the N400 directly reflect compositional sense-making? *Psychophysiology*, Special Issue: Society for Psychophysiological Research Abstracts for the Forty-Ninth Annual Meeting, 46(Suppl. 1), s2.

Vokey, J. R., & Brooks, L. R. (1992). The salience of item knowledge in learning artificial grammars. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 10.

von Stein, A., Chiang, C., & Konig, P. (2000) Top-down processing mediated by interareal synchronization. *Proc Natl Acad Sci* , 97, 14748-14753.

Weiss, S., & Mueller, H. M. (2012). “Too many betas do not spoil the broth’’: The role of beta brain oscillations in language processing. *Frontiers in Psychology*, 3, 201.

Whittlesea, B.W. A. & Dorken, M.D. (1993). Incidentally, things in general are particularly determined: An episodic-processing account of implicit learning. *Journal of Experimental*