

Potenciales evocados cerebrales en el contexto de la investigación psicológica: una actualización

M. Isabel Núñez-Peña
M. José Corral
Carles Escera
Universitat de Barcelona

En este artículo se presenta la técnica de registro de los potenciales evocados (PEs) en el contexto de la investigación psicológica. En primer lugar, se abordan aspectos tales como el proceso de obtención de un potencial evocado, sus características definitorias, la forma en que se clasifican, sus principales ventajas respecto a otro tipo de medidas usualmente utilizadas por la psicología, etc. A continuación se repasan brevemente dos de los procesos cognitivos que han generado más investigación con esta técnica, concretamente la atención y el lenguaje, así como los recientes avances que se han desarrollado en el campo de los procesos emocionales. Se comentan después los principales potenciales evocados que se utilizan para abordar este tipo de procesos psicológicos.

Palabras clave: procesos cognitivos, neuroimagen, PEs, MMN, P300, N400.

Event-related brain potentials (ERPs) are presented in the context of the psychological research. Firstly, aspects such as how an ERP is obtained, their characteristic features, the way in which they are classified, or their main advantages with respect to another type of measures usually used in Psychology, are presented. Then, two cognitive processes that have been extensively investigated with this technique are briefly reviewed, concretely, attention and language, and the recent research in the study of emotional processes is also commented. The main ERPs that have been used to study these psychological processes are discussed.

Key words: Cognitive processes, neuroimage, ERPs, MMN, P300, N400.

Uno de los principales objetos de estudio de la psicología es la cognición humana y para abordarlo esta disciplina ha utilizado distintas técnicas. Queremos presentar aquí una técnica concreta: el registro de potenciales evocados (PEs). Esta técnica ha permitido ampliar el conocimiento sobre algunas operaciones cognitivas a partir del comportamiento de ciertos potenciales eléctricos cerebrales. El argumento que subyace a la utilización de esta técnica de registro para investigar estos procesos psicológicos es el siguiente: dado que los procesos cognitivos se suponen relacionados con la actividad eléctrica cerebral, y puesto que los PEs son fluctuaciones de los potenciales eléctricos del cerebro provocadas por la ocurrencia de un suceso —o por la presentación de un estímulo—, parece que estos últimos pueden ser buenos candidatos para ayudarnos a comprender mejor el sistema cognitivo humano. En definitiva, se considera que los PEs son indicadores de procesos o subprocesos cognitivos o perceptivos. Aspectos, entre otros, como la latencia del proceso cognitivo, su presencia o ausencia, o su relación con otros procesos podrán determinarse a través de la información que obtengamos mediante este tipo de técnica de registro. De hecho, basta con echar una ojeada a la literatura sobre PEs para comprobar que su utilización se está extendiendo cada vez más en varios campos de la psicología cognitiva: atención, procesamiento de la información, memoria, comprensión del lenguaje, procesos emocionales, entre otros.

Existen bastantes trabajos en los que se pueden encontrar detalladas introducciones de los potenciales evocados¹ (Coles, Gratton y Fabiani, 1990; Coles y Rugg, 1995; Garnsey, 1993; Kutas y Dale, 1997; Kutas y Van Petten, 1994; entre otros), no obstante, la mayoría de estas introducciones se encuentran escritas en inglés y consideramos que es útil ofrecer una breve presentación de esta temática en lengua castellana. Expondremos brevemente qué es un PE; cuál es el procedimiento que hay que seguir para obtenerlo; cuáles son sus características definitorias; cómo suelen clasificarse; y, finalmente, qué información nos aportan, es decir, cuál es su utilidad. En este último apartado destacaremos dos procesos cognitivos, la atención y el lenguaje, sobre los que se ha adquirido un mayor conocimiento gracias al uso del registro de potenciales evocados. También se tratarán los recientes descubrimientos que se han alcanzado, mediante la utilización de esta técnica, en el campo de estudio de las emociones.

Definición de potencial evocado

Coles y Rugg (1995) definen los PEs como fluctuaciones en el voltaje del electroencefalograma (EEG) provocadas por sucesos sensoriales, motores o cognitivos. En efecto, se ha observado que tras la presentación de un determinado tipo de estímulo o la realización de alguna tarea se producen cambios constantes

1. Hemos optado aquí por utilizar el término *potencial evocado* en lugar del término anglosajón ERP (*event-related potential*) por usar la terminología que se utiliza habitualmente en lengua castellana. No obstante, dado que la mayoría de los artículos y libros sobre este tema se han publicado en lengua inglesa, conviene que el lector conozca también la terminología anglosajona.

en el EEG. Estos cambios adoptan la forma de picos o valles y se supone que nos informan acerca de los procesos cognitivos que subyacen. En cuanto al sustrato fisiológico de los PES, se sabe que la actividad eléctrica registrada en el cuero cabelludo es la suma de los potenciales post-sinápticos generados por la despolarización e hiperpolarización de las células cerebrales. No entraremos aquí a explicar los detalles de la fisiología de los PES, por lo que remitimos al lector interesado, por ejemplo, a los trabajos de Allison, Wood y McCarthy (1986), Nuñez (1981, 1990), Picton, Lins y Scherg (1995), Wood (1987), Eggermont y Ponton (2002) y en castellano a Gómez, Escera, Cilveti, Díaz, y Portavella (1992).

Por lo que se refiere a la nomenclatura que usualmente se utiliza para referirse a un PE concreto, encontramos que la terminología es variada. En ocasiones se utilizan como sinónimos los términos pico, onda o componente. Algunos autores, sin embargo, han tratado de ser más precisos y han definido el término *componente* como algo distinto de un pico o una onda. Definen componente como una porción del registro de la actividad eléctrica cerebral, sensible a una manipulación experimental concreta, que se considera un reflejo de un proceso particular o de un grupo de procesos. En este sentido, un componente puede ser tanto un único pico como una secuencia de picos (Coles, Gratton y Fabiani, 1990). Ocurre, sin embargo, que en muchas ocasiones todavía se siguen utilizando los términos pico y onda indistintamente como si fueran sinónimos de componente.

Procedimiento para obtener los potenciales evocados

Los PES se obtienen colocando electrodos sobre varias posiciones en la cabeza, para lo que se utilizan usualmente las propuestas en el Sistema Internacional 10-20 (Jasper, 1958; véase Figura 1). En este sistema cada localización viene definida por dos coordenadas: una, su proximidad a una región concreta del cerebro (frontal, central, temporal, parietal y occipital); y, otra, su ubicación en el plano lateral (números impares para la izquierda, números pares para la derecha y la letra z para las localizaciones centrales). Aparte de estas localizaciones, en algunos experimentos se colocan electrodos sobre otras zonas del cuero cabelludo (por ejemplo sobre el área de Wernicke o sobre el área de Broca).

Hasta aquí, el registro de PES no difiere del registro de EEG espontáneo. Sin embargo, cabe mencionar dos aspectos diferenciales en el proceso que nos permite obtener cada uno de ellos. La primera diferencia destacable entre los PES y el EEG espontáneo se refiere a su generación. Dado que un PE recoge actividad eléctrica cerebral provocada por la presentación de un estímulo externo, será necesaria bien la exposición de un estímulo, bien la realización de una tarea para que el PE aparezca. Dicho de otro modo: si no tenemos *un suceso* no podremos provocar un PE. El segundo aspecto diferencial en los procedimientos para obtener los PES y el EEG tiene que ver con las diferencias que hay entre ellos en cuanto a su voltaje. A saber: en términos generales la amplitud es de entre 1 y 20 microvoltios en los PES y de entre 50 y 100 microvoltios para el EEG (Kutas y Van Petten, 1994). En conse-

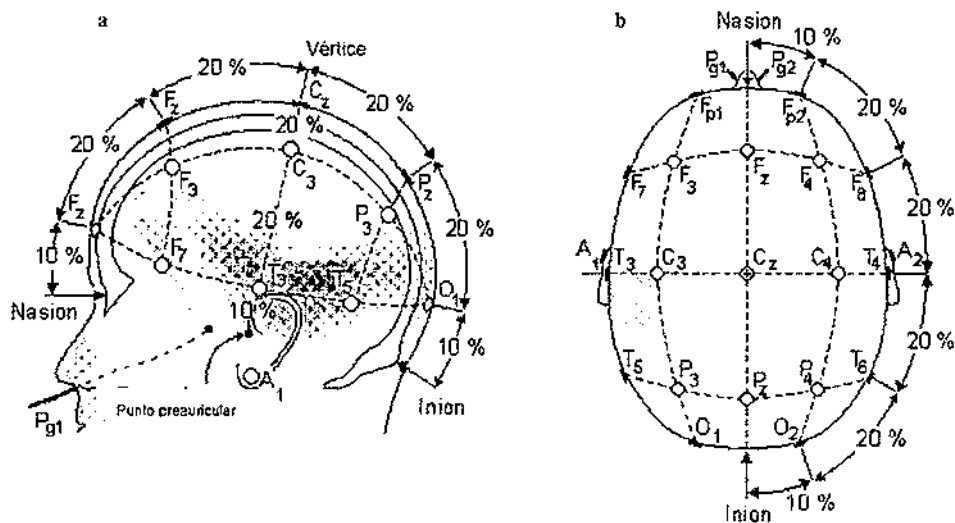


Figura 1. Sistema Internacional 10-20. Distribución de los electrodos sobre la superficie de la cabeza con las posiciones básicas obtenidas a partir del 10% y 20% de la medida total del cráneo. A: lóbulo auditivo, C: surco central, Pg: nasofaringeal, P: parietal, F: frontal, Fp: prefrontal y O: occipital. a) Visión sagital izquierda, b) Visión coronal. Adaptado de Sharbrough, F., Chatrian, G. E., Lesser, R. P., Lüders, H., Nuwer, M. y Picton, T. W. (1991).

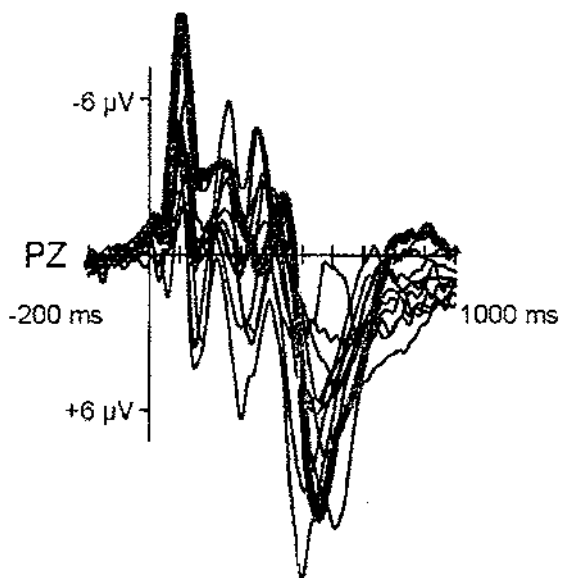


Figura 2. Onda promedio (trazado gris) obtenida a partir de 12 estímulos individuales (trazados negros) ante la presentación de un mismo estímulo auditivo diana.

cuencia, resulta difícil, por no decir imposible, distinguir una fluctuación tan pequeña en voltaje a lo largo del EEG espontáneo. No obstante, existen varios métodos para separarlos: el más utilizado consiste en el cálculo de un potencial promedio que permite detectar el PE. Llegaremos a este potencial promedio registrando en primer lugar varios fragmentos o épocas de EEG tras la presentación de un mismo estímulo, y, posteriormente, promediándolos (véase Figura 2). La suposición que motiva esta técnica radica en lo siguiente: la actividad eléctrica que no está relacionada con el procesamiento del estímulo externo varía aleatoriamente a lo largo de las distintas épocas registradas, mientras que la actividad provocada por el estímulo se mantendrá constante. De esta manera, en el promedio, las fluctuaciones aleatorias en voltaje se igualarán a cero y se destacará una onda residual; esta actividad, en la que se han cancelado las fluctuaciones aleatorias, es el PE. Debido a las características propias del promediado se debe trabajar con muchos ensayos o épocas para conseguir una adecuada razón señal/ruido, es decir, para obtener una mejor definición de la señal.

Características definitorias del potencial evocado

Ya hemos expuesto qué es un PE y cuál es el procedimiento que hay que seguir para obtenerlo, el siguiente paso será comentar sus características definitorias. Donchin, Ritter y McCallum (1978) indican que un componente ha de definirse por una combinación de su polaridad, latencia, topografía y sensibilidad a las características de la manipulación experimental –cabe destacar que las características primera y tercera recogen información sobre la fuente fisiológica, mientras que las otras dos se refieren a la función psicológica. En primer lugar, en lo que se refiere a la polaridad, los componentes pueden ser de dos tipos: positivos o negativos. En este sentido, denominaremos P a los componentes con polaridad positiva, y N a los que tengan polaridad negativa. En segundo lugar, con respecto a la latencia, ésta suele medirse tomando el tiempo en milisegundos desde la presentación del estímulo hasta la aparición del pico o del valle; esto es, hasta el punto de máxima o mínima amplitud dentro de una ventana de latencia concreta. Así, por ejemplo, el componente N400 es una onda negativa que presenta un pico aproximadamente a los 400 milisegundos después de la presentación del estímulo. Esta denominación que recoge la latencia del componente tiene un problema, puesto que, en muchas ocasiones, se utiliza una terminología de este tipo para identificar un componente que puede presentar variaciones importantes en cuanto a su latencia. Tal es el caso del componente P300, un pico de polaridad positiva que ha sido ampliamente investigado (en la literatura encontramos P300 incluso en un rango de latencia entre 500 y 700 ms dependiendo del tipo de estímulo, de los sujetos o de la tarea). Es por esta razón por la que algunos investigadores prefieren designar los componentes con otro término. Proponen mantener la polaridad pero con el añadido de un número que indique el orden de aparición del pico. Por ejemplo: P3 se referirá a un pico positivo que aparece en tercer lugar; N2 designa el segundo pico negativo después de la presentación del estímulo.

La tercera característica definitoria de los componentes, según la propuesta de Donchin, Ritter y McCallum (1978), es su topografía, es decir, su distribución en el cuero cabelludo. Hemos comentado anteriormente que el registro de la actividad eléctrica se realiza en varias localizaciones, lo que nos permite, entre otras cosas, detectar si existe un lugar en concreto donde aparece un determinado componente y si hay diferencias hemisféricas. No obstante, debemos tener muy en cuenta lo siguiente: las fluctuaciones en el voltaje recogidas con un electrodo sobre el cuero cabelludo no han de tomarse como actividad originada por el tejido cerebral directamente subyacente a esa localización, es decir, que la topografía sobre el cuero cabelludo no suministra un mapa de la localización neuronal. De hecho, la actividad generada en un área concreta del cerebro puede haberse registrado en una localización situada a una considerable distancia de su generador.

Finalmente, la última característica definitoria de un componente hace referencia a su sensibilidad respecto de una determinada manipulación experimental. Este es el criterio más difícil, puesto que existen componentes bastante inespecíficos. El caso más notorio es el de la familia de los P300s, ondas que aparecen utilizando sucesos muy diversos. Otro componente controvertido es el N400, cuya especificidad como indicador del procesamiento semántico también se ha puesto en duda (Niedeggen, Rösler y Jost, 1999; Olivares, Bobes, Aubert y Valdés-Sosa, 1994; Stuss, Picton, Cerri, Leech y Stethem, 1992). A pesar de esto, la sensibilidad a determinadas manipulaciones experimentales sigue siendo un elemento fundamental para separar componentes.

Recientemente, Picton *et al.* (2000) han manifestado el problema que supone la ausencia de consenso por parte de los investigadores para designar los distintos componentes. Estos autores distinguen entre lo que denominan terminología observacional y terminología teórica: la primera consiste en designar un componente en función de las características físicas de la onda medida en un grupo de datos, mientras que la segunda se fundamenta en el tipo de proceso psicofisiológico que supuestamente la origina. Afirmán, además, que ante algunos estudios de PES cognitivos resulta difícil discernir si los investigadores están utilizando una terminología observacional o una teórica para referirse a un determinado componente. Sugieren, por tanto, que sería conveniente separar ambas nomenclaturas y su propuesta consiste en colocar una línea sobre el nombre del componente cuando nos estamos refiriendo al mismo en sentido teórico —por ejemplo, P300. La revisión teórica que hemos llevado a cabo sobre distintos componentes de los potenciales evocados nos ha confirmado la idoneidad de la indicación de estos autores, puesto que en muchas ocasiones al leer los artículos no queda claro a qué se refieren exactamente los investigadores cuando designan un componente.

Clasificación de los potenciales evocados

En la línea de las cuestiones que planteábamos al principio de este artículo ahora debemos pasar a comentar la clasificación de los PES. Queremos destacar

dos clasificaciones: una que diferencia entre PES exógenos y PES endógenos; otra que los clasifica en PES previos a la ocurrencia de un suceso y PES posteriores a su ocurrencia. El primer criterio clasificatorio establece una serie de características diferenciales entre los PES denominados exógenos y los llamados endógenos: primera, los potenciales exógenos son de latencia más corta que los potenciales endógenos –si los primeros aparecen en los primeros 100 o 150 ms tras la presentación del estímulo, los segundos son más tardíos–; segunda, los exógenos se ven afectados por las características físicas del estímulo (por ejemplo, la modalidad de presentación –auditiva, visual, somestésica, etc.– o la intensidad), mientras que los endógenos no –por el contrario, estos últimos sí se ven influidos por factores tales como la atención, la relevancia de la tarea o el estado del sujeto durante el procesamiento del estímulo; es más, algún potencial endógeno aparece incluso en ausencia de un suceso externo, como, por ejemplo, cuando un estímulo esperado no ocurre. Respecto de esta clasificación, Coles y Rugg (1995) defienden que no se trata tanto de una dicotomía como de un continuo. Según ellos basta con advertir que casi todos los componentes sensoriales tempranos pueden ser modificados por manipulaciones cognitivas (por ejemplo, la atención). Por otra parte, muchos de los componentes cognitivos tardíos pueden verse afectados por las características físicas del estímulo. En consecuencia, es más adecuado hablar de una dimensión exógeno-endógena, de manera que aquellos componentes que aparecen dentro de los primeros 100 ms tras la presentación del estímulo tenderían a ser más exógenos, mientras que aquellos de aparición más tardía tenderían a considerarse más endógenos.

Respecto a la segunda clasificación de PES, la encontramos en el trabajo de Coles y Rugg (1995), en donde se agrupan los componentes en dos clases: los que son previos a la ocurrencia del suceso y los posteriores a su ocurrencia. Cada uno de estos grupos incluye varios componentes: entre los primeros destacan el potencial de respuesta (*Lateralized Readiness Potential* –LRP) y la variación negativa contingente (*Contingent Negative Variation* –CNV); en cuanto a los segundos, se distingue entre componentes sensoriales, las ondas Nd, el potencial de disparidad (*Mismatch Negativity* –MMN), las ondas P300s y la onda N400. Veamos una pequeña descripción de cada uno de ellos:

– El componente LRP (también conocido como *Bereitschaftspotential*) fue identificado en un primer momento por Kornhuber y Deeke (1965) en sus estudios sobre los movimientos voluntarios. Se trata de un potencial negativo que aparece cuando el sujeto se prepara para realizar un movimiento con una mano. Además, se ha observado que presenta máxima amplitud (sobre 10-15 μv) en las localizaciones precentrales y es contralateral a la mano de respuesta escogida.

– La CNV fue descrita por primera vez por Walter y sus colaboradores (Walter, Cooper, Aldridge, McCallum y Winter, 1964). Esta onda aparece cuando se presentan dos estímulos separados por un intervalo de tiempo y se establece una contingencia entre ambos. Se trata de una onda negativa lenta que alcanza su máxima amplitud (hasta 20 μv) cuanto más cerca estamos del segundo estímulo. Además, se ha observado que tiene máxima amplitud en regiones centro-frontales y parece que tiene que ver con los procesos de preparación de respuesta. Sin embargo, estudios posteriores (Loveless y Sanford, 1974) sugieren que la CNV

está compuesta en realidad por dos componentes distintos: las denominadas *O-wave* y las *E-wave*. A este respecto, estos autores afirman que la primera onda es un signo de orientación, mientras que la segunda tiene que ver con el potencial de respuesta descrito por Kornhuber y Deeke. Remitimos al lector interesado en esta discusión a Brunia (1993), Harter y Anllo-Vento (1991), Rohrbaugh y Gaillard (1983) o Simons (1988).

– Dentro de los **componentes sensoriales** se recogen todos aquellos denominados exógenos. Este grupo de potenciales se caracteriza por ser respuestas obligatorias del sistema nervioso a estímulos externos. De hecho, se considera que recogen la actividad de las vías sensoriales cuando transmiten la señal generada por los receptores periféricos al sistema de procesamiento central. Esto se ve apoyado por el hecho de que se trata de componentes específicos de la modalidad sensorial. Tanto es así que difieren en forma y en distribución cortical dependiendo del tipo de modalidad sensorial en que se presente el estímulo. Se puede encontrar una buena revisión de estos componentes en Hillyard, Picton y Regan (1978).

– **Nd, N100 o Processing Negativity**. Todos los términos anteriores se suelen utilizar como sinónimos para referirse a una onda negativa que aparece aproximadamente a los 100 milisegundos. Este potencial surge al comparar la actividad evocada por estímulos atendidos con aquella evocada por estímulos no atendidos. Concretamente esta negatividad parece estar asociada a la atención. Sin embargo, en este punto hay controversia. Ésta se debe a que otro grupo de investigadores (Näätänen, Gaillard y Mantysalo, 1978) argumentan que el efecto de la atención se refleja en un cambio negativo observado ante estímulos atendidos. Más información sobre esta polémica puede encontrarse en Näätänen (1992) y Mangun y Hillyard (1995). En castellano se ha revisado ampliamente en Escera (1996).

– **P300, P3, P3a y P3b**. El grupo de los componentes P300s se ha investigado extensamente, tanto desde un punto de vista teórico como desde una perspectiva clínica. Se trata de una serie de picos positivos, los cuales, a pesar de presentar múltiples diferencias entre ellos, también presentan varios elementos comunes. En primer lugar, suelen aparecer ante estímulos inesperados que son relevantes para la tarea que ha de realizar el sujeto. En segundo, su latencia varía dependiendo de la dificultad de la tarea. En tercero, su amplitud se ve modulada por el grado de expectación que el sujeto tiene de un determinado estímulo.

El componente P300 se ha utilizado en una gran variedad de aplicaciones teóricas, empíricas y clínicas. En particular, se considera como un índice de la memoria de trabajo (Donchin, Karis, Bashore, Coles y Gratton, 1986), de forma que su amplitud informa de la asignación de los recursos atencionales y su latencia es un indicador del tiempo de evaluación del estímulo (Katayama y Polich, 1998). El componente P300 se obtiene utilizando el llamado paradigma *oddball*, donde dos estímulos, uno de mayor probabilidad que el otro, se presentan en orden aleatorio. El participante debe discriminar el estímulo infrecuente (diana), del frecuente (estándar), bien apretando un botón de respuesta, bien contando mentalmente (Duncan-Johnson, 1977; Polich, 1989b, 1990; Verleger, 1991). El P300 generado en esta tarea por el estímulo diana, conocido

como P3b, es un potencial positivo de mayor amplitud sobre los electrodos parietales que se manifiesta hacia los 300 ms en adultos jóvenes sanos.

Squires, Squires y Hillyard (1975) describen otra onda positiva con distribución frontocentral y provocada por cambios ocasionales en frecuencia o en amplitud que ocurren en la cascada de estimulación auditiva –tanto para condiciones atendidas como no atendidas. Esta onda positiva se identifica como P3a. Posteriormente, una modificación del paradigma *oddball* se utilizó de forma que un tercer estímulo infrecuente no atendido (novedoso) se presentaba en la típica secuencia de estándares y estímulos diana. Utilizando este procedimiento, Courchesne, Courchesne y Hillyard (1978) describieron una onda P300, distribuida frontocentralmente para el estímulo novedoso, que también se denominó P3a. Resumiendo, P3a puede ser producida por diferentes tipos de estímulos no atendidos (no diana): estímulos infrecuentes en condiciones pasivas, estímulos físicamente novedosos o estímulos infrecuentes no atendidos en paradigmas *oddball* de 3 o más estímulos.

De hecho, estos sucesos activan una red cerebral distribuida que moviliza los recursos atencionales, a expensas de la tarea en curso, para llevar al foco de la evaluación consciente esos estímulos distractores, inicialmente no atendidos. Se ha propuesto que la activación de esta red cerebral de orientación atencional se reflejaría en el llamado P3a o NP3 (*novelty-P3*, por su generación ante estímulos ambientales novedosos), que se observa en los registros tras N1 y/o MMN (Escera, Alho, Winkler y Näätänen, 1998; Friedman, Cycowicz y Gaeta, 2001; Grillon, Courchesne, Ameli, Geyer y Braff, 1990; Knight, 1984; Squires *et al.*, 1975; Woods, 1992). En concreto, estudios recientes describen que su generación consta de dos fases diferenciadas (Escera *et al.*, 1998; Escera, Yago y Alho, 2001). Una primera fase inicial, de latencia 220-320 ms, tiene una distribución bilateral central y es insensible a manipulaciones atencionales. En cambio, una segunda fase, que ocurre a los 300-400 ms, es de distribución fronto-derecha y muestra modulación ante manipulaciones atencionales (Escera *et al.*, 1998; Yago, Escera, Alho, Giard y Serra-Grabulosa, 2003; véase Figura 3).

– El **potencial de disparidad** (MMN) se obtiene al presentar un estímulo discrepante dentro una secuencia de estímulos auditivos. Este estímulo discrepante se caracteriza porque presenta una baja probabilidad de aparición y difiere del estímulo típico en alguno de sus atributos físicos –frecuencia, intensidad, duración, tono o localización (Escera 1997). Durante el registro se instruye al sujeto para que ignore la estimulación auditiva y se concentre en alguna otra actividad, tal como leer un libro o mirar la televisión, por lo que la MMN se obtiene de forma pasiva –de hecho este componente se ha registrado incluso en niños recién nacidos (Alho, Sainio, Sajaniemi, Reinikainen y Näätänen, 1990) y en pacientes en coma (Kane, Curry, Butler y Cummins, 1993). La MMN, cuya latencia se sitúa en torno a los 150 ms, se obtiene mediante el cálculo de una onda diferencia que consiste en restar el potencial generado ante la estimulación típica del generado ante los estímulos discrepantes (Figura 4).

Se ha demostrado que el factor crítico en la generación de la MMN es la detección del cambio acústico y no la activación de poblaciones neuronales específicas sensibles a los atributos físicos del estímulo discrepante (Jacobsen y

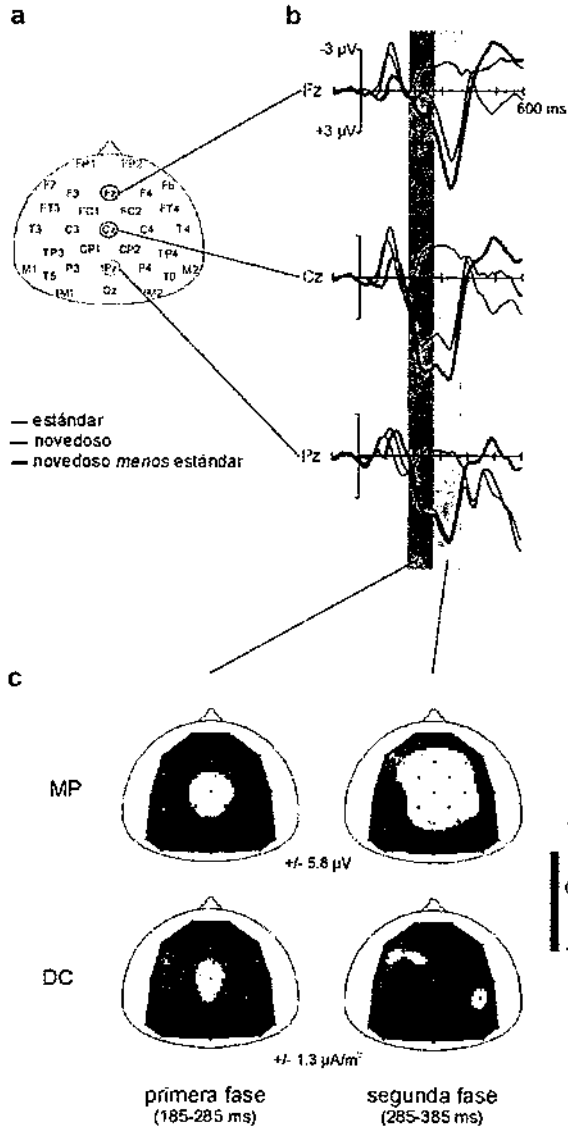


Figura 3. La P3a: a) Distribución sobre la cabeza de los 30 electrodos utilizados en el registro de EEG; b) PE en los electrodos de línea de medio obtenidos para los estímulos estándares y novedosos, además de las correspondientes ondas diferencia. Las sombras grises muestran las dos fases de la P3a, en los rangos de latencia de 185-285 ms (gris oscuro) y 285-385 ms (gris claro); c) Mapa de potencial (MP) y densidad de corriente (DC) de las dos fases de P3a. La DC analiza las corrientes positivas sobre el área central, temporoparietal, bilateral y el área frontotemporal izquierda durante la primera fase de P3a, y sobre el área superior parietal, temporoparietal bilateral y áreas frontales durante la segunda fase de P3a. Adaptado de Yago *et al.* (2003).

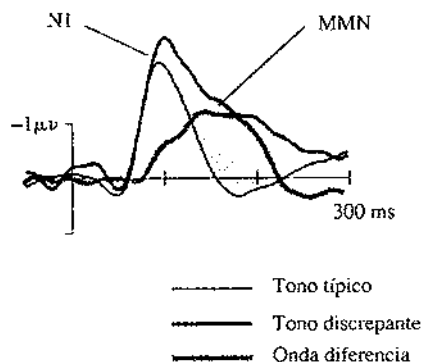


Figura 4. PE ante un tono auditivo típico (línea fina) y un tono discrepante de baja probabilidad (línea gruesa). El área sombreada muestra la MMN. La onda diferencia (línea gris) resultante de sustraer el PE estándar del PE discrepante muestra claramente la activación neuroeléctrica causada por el cambio auditivo.

Schröger, 2001). Este hecho destaca porque pone de relieve dos de las principales implicaciones funcionales de la MMN: su relación con la memoria sensorial auditiva y su utilidad para revelar la representación central del sonido. En efecto, si la MMN se genera ante el cambio acústico asociado al estímulo discrepante, en relación con la estimulación repetitiva precedente, es porque los atributos de esta última se han almacenado en algún tipo de registro de memoria. Así, manipulando el intervalo entre la ocurrencia de los distintos estímulos en la serie, se puede investigar la disponibilidad temporal de esta huella en memoria (Winkler, Schröger y Cowan, 2001) o, lo que es lo mismo, su duración (*span* de memoria sensorial auditiva), que se ha estimado en unos 10 segundos (Sams, Hari, Rif y Knuutila, 1993).

La MMN se registra con máxima amplitud negativa en áreas centrales y frontales, y con polaridad positiva en los registros realizados en las apófisis mastoides (cuando se utiliza un electrodo de referencia situado en la nariz). Esta distribución en superficie, con máximo sobre áreas fronto-centrales e inversión de polaridad en mastoides, se debe a la localización supratemporal de sus generadores neurofisiológicos (véanse revisiones en Alho, 1995; Escera, Alho, Schröger y Winkler, 2000a). Los estudios de análisis de densidad de corriente de la MMN han mostrado corrientes bilaterales en áreas supratemporales (Giard *et al.*, 1995). Igualmente, el modelado de dipolos a partir del registro del componente magnético de MMN muestra generadores localizados en el córtex auditivo primario o sus proximidades (Hari *et al.*, 1984). La implicación del córtex auditivo en la generación de la MMN la sugiere también el estudio de pacientes con lesiones cerebrales en estas áreas (Alain, Woods y Knight, 1998), así como investigaciones recientes realizadas con resonancia magnética funcional (Celsis *et al.*, 1999; Opitz, Rinne, Mecklinger, von Cramon y Schröger, 2002).

Además del córtex temporal, otras regiones cerebrales parecen contribuir a la generación de la MMN. Varios estudios han informado de la contribución del

córtex frontal –probablemente desde el córtex dorsolateral prefrontal– (Alain *et al.*, 1998; Celsis *et al.*, 1999; Giard, Perrin, Pernier y Bouchet, 1990; Levänen *et al.*, 1996; Opitz *et al.*, 2002; Rinne *et al.*, 2000; Yago, Escera, Alho y Giard, 2001) en la generación de la MMN. Considerando su participación en el control de la dirección de la atención (Barceló, Suwazono & Knight, 2000; Fuster, 1997) es muy posible que la contribución del córtex prefrontal a la MMN esté relacionada con las implicaciones funcionales de este potencial cognitivo en los mecanismos cerebrales de control involuntario de la atención (Escera *et al.*, 2000a).

– **N400**. Se trata de una onda negativa, con topografía centroparietal y latencia en torno a los 400 ms, que se considera un indicador del procesamiento semántico (véase Figura 5). La primera vez que se informa de este componente es en el trabajo publicado por Hillyard y Kutas (1980), en el cual estos autores encontraron una onda negativa –que denominaron N400– provocada por la presentación de una palabra semánticamente anómala al final de una sentencia (por ejemplo, en sentencias como *He went to the post office to mail the house*). En este primer momento se consideró que el componente N400 era un signo electrofisiológico del reprocesamiento de la información semánticamente anómala, no obstante, experimentos posteriores matizaron esta explicación sobre la naturaleza de este componente. En efecto, cabe destacar otro experimento realizado por estos mismos autores (Kutas y Hillyard, 1984) donde se puso de manifiesto que la anomalía semántica era condición suficiente pero no necesaria para provocar la aparición de este componente. En esta ocasión se manipuló la probabilidad de cierre (*cloze probability*) de las palabras para completar las sentencias y pudo comprobarse que la amplitud del N400 se relacionaba en forma inversa con dicha probabilidad, de manera que a medida que decrecía la probabilidad de cierre se incrementaba su amplitud. De este modo pudo comprobarse cómo también una palabra semánticamente correcta en el contexto de una sentencia, pero que no era la mejor terminación para la misma, provocaba esta onda negativa.

En esta misma línea, Kutas, Lindamood y Hillyard (1984) mostraron que el componente N400 era, a su vez, sensible al tipo de anomalía semántica que se presentaba. Manipularon el tipo de final de una sentencia utilizando tres tipos de palabras: la mejor terminación para la sentencia, una palabra semánticamente anómala relacionada con la mejor terminación o una palabra semánticamente anómala no relacionada con la mejor terminación. Por ejemplo, para la sentencia *The pizza was too hot to...*, los finales eran *eat*, *drink* y *cry*, respectivamente. Los resultados mostraron que el componente N400 mostraba máxima amplitud ante el tercer tipo de final (*cry*), intermedia para el segundo (*drink*) y mínima para el primer tipo (*eat*). En consecuencia, parecía que este componente era un indicador de dos procesos: el primero, la expectación que tenemos de una palabra a partir del contexto y, el segundo, la asociación semántica que una palabra guarda con la mejor terminación. En definitiva, Kutas *et al.* sugieren que el componente N400 es un índice de la cantidad de preparación semántica o activación que una palabra recibe del contexto que la precede.

A partir de estos primeros trabajos, se ha desarrollado una gran producción científica en torno a este componente sobre la que pueden encontrarse excelentes revisiones en Kutas y Federmeier (2000), Kutas y Van Petten (1994) o

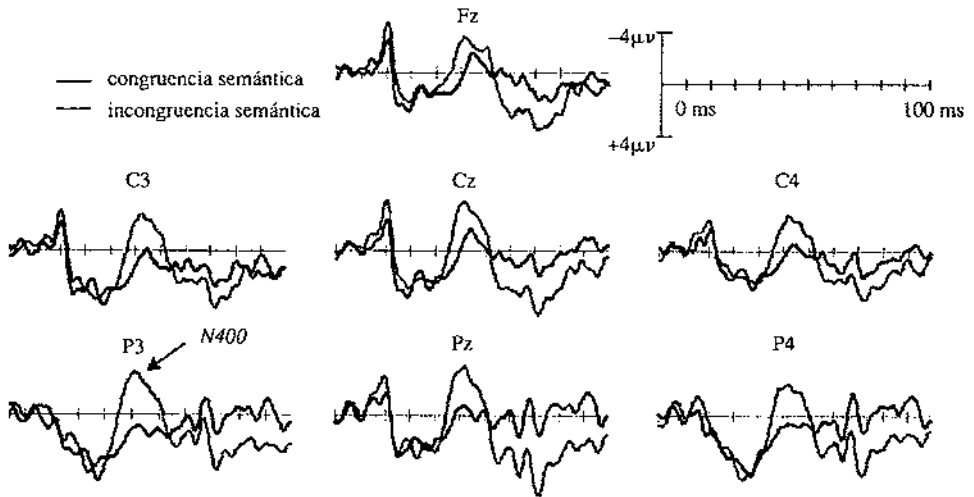


Figura 5: PES obtenidos ante la presentación de una palabra congruente o incongruente respecto a un contexto semántico previo. Destaca la presencia, para las palabras semánticamente incongruentes, del componente N400, el cual muestra máxima amplitud en localizaciones centro-parietales (adaptado de Núñez, 2001).

Brown y Hagoort (2000), entre otros. Respecto a este componente también cabe destacar un trabajo muy reciente en el que se han validado las sentencias originales de Kutas a los idiomas castellano y catalán (Gironell *et al.*, 2003).

Además de los componentes que se han detallado en párrafos anteriores, existen otros, de descubrimiento más reciente, con los que se está trabajando en la actualidad pero cuya naturaleza específica todavía está por delimitar. Entre estos se encuentran los componentes LAN (*Left Anterior Negativity*; Coulson, King y Kutas, 1998) y SPS (*Syntactic Positive Shift*; Osterhout y Holcomb, 1992) vinculados al procesamiento sintáctico del lenguaje; el componente RATN (*Right Anterior-Temporal Negativity*; Patel, Gibson, Ratner, Besson y Holcomb, 1998) asociado al procesamiento de estímulos musicales; el potencial de reconocimiento (Rudell, 1991), pico positivo con latencia entre 200 y 250 ms vinculado al reconocimiento semántico del estímulo; el componente ERN (*Error Related Negativity*) que aparece inmediatamente después de que una persona cometa un error (Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann y Blanke, 1990); etcétera.

Utilidad del registro de potenciales evocados y sus principales aplicaciones en psicología

Una vez que hemos expuesto el concepto de PE, cómo se obtienen, cuáles son sus principales características y cuál es su tipología, hay que aclarar otra

cuestión fundamental, quizá la más importante. ¿Para qué nos sirve el registro de PES?; o, dicho de otro modo, ¿qué información nos aporta? Ya hemos dicho que la utilidad fundamental del registro de PES es que nos permite obtener información sobre el funcionamiento de la cognición humana. En este sentido vamos a destacar ahora las principales ventajas que presenta esta técnica para el estudio de los procesos cognitivos respecto de otras técnicas que la psicología había venido utilizando para investigar estos procesos. Después, profundizaremos en dos procesos cognitivos concretos, la atención y el lenguaje, los cuales han generado mucha investigación mediante el registro de PES. También se abordarán los procesos emocionales que, aunque no han producido tanta investigación como los anteriores, sí que han abierto un reciente e interesante campo de aplicación en psicología.

Cabe destacar cuatro ventajas fundamentales que presenta la técnica de registro de PES. La primera radica en el hecho de que el registro de potenciales evocados es una técnica no invasiva. Consiste en la utilización de electrodos ubicados en la superficie de la cabeza, siendo el registro totalmente inocuo para la persona. En segundo lugar, permite obtener una medida de la actividad cerebral en contextos en los que la obtención de una respuesta conductual puede ser problemática o imposible. Con esto queremos destacar el hecho de que los potenciales evocados pueden registrarse independientemente de que el sujeto deba realizar una tarea específica o emitir una respuesta motora. Por ejemplo, este tipo de registro puede utilizarse en sujetos que no pueden colaborar, tales como pacientes en coma, niños pequeños o recién nacidos. Sin necesidad de ir a casos tan extremos, esta característica hace que los potenciales evocados sean especialmente útiles en otros campos como el estudio del lenguaje. En este caso se podrán registrar PES tras instruir al sujeto en la audición o lectura de algunas sentencias, sin que haya ninguna demanda extraña impuesta a la tarea. La tercera ventaja consiste en que el registro de PES nos aporta múltiples datos. A diferencia de las medidas conductuales —como por ejemplo el tiempo de reacción, que nos aporta una única fuente de información para explicar el proceso psicológico bajo estudio—, los potenciales evocados nos ofrecen una perspectiva multidimensional del proceso. Nos referimos a que se puede obtener para cada condición experimental información sobre la latencia, la amplitud, la polaridad y la topografía del componente de interés. Todas estas fuentes de información pondrán a nuestro alcance un conocimiento más preciso del proceso psicológico subyacente. Cuarta ventaja: la alta resolución temporal del registro de PES —en orden de milisegundos— nos permite estudiar la evolución o secuencia de actividad neuronal subyacente a funciones cerebrales superiores. De este modo se podrán investigar distintos procesos cognitivos en tiempo casi real.

Para finalizar queremos hacer una breve mención de las principales aportaciones del registro de los potenciales evocados al conocimiento de tres procesos cognitivos: la atención, el procesamiento del lenguaje y las emociones.

En la sección precedente se han revisado algunos resultados que muestran la utilidad de la MMN como índice de la representación cerebral del sonido y su precisión, así como de la plasticidad del sistema auditivo durante el entrenamiento o el aprendizaje de nuevos sonidos, incluidos los del lenguaje. Por tanto,

desde hace tiempo se ha venido proponiendo que la MMN podría utilizarse como un potente instrumento de investigación clínica, incluso para el diagnóstico, pronóstico y seguimiento de la rehabilitación en determinadas patologías neurológicas, psiquiátricas y neuropediátricas (Escera, 1997a, 1997b; Escera *et al.*, 2001; Näätänen y Escera, 2000; véanse también Gené-Cos, Ring, Pottinger y Barrett, 1999; Müller y Mayers, 2001).

Un aspecto relevante de la investigación con la MMN en ámbitos clínicos es que se obtiene en condiciones pasivas, es decir, sin necesidad de solicitar ninguna tarea activa al sujeto. Por tanto, la MMN constituye un potente instrumento para estudiar el substrato neurofisiológico de los fenómenos subjetivos de la audición en ausencia de requerimientos conductuales.

Respecto del procesamiento del lenguaje habremos de distinguir dos usos de los potenciales evocados en la investigación neurolingüística (Segalowitz y Chevalier, 1998). En primer lugar, los potenciales evocados se pueden utilizar como variable dependiente para diversas finalidades: contrastar hipótesis sobre el procesamiento del lenguaje, distinguir entre lenguas distintas, y estudiar el desarrollo y adquisición de una lengua. De este modo, la utilización de estas técnicas de registro psicofisiológicas puede aportar nuevas evidencias para contrastar los modelos del procesamiento del lenguaje. En segundo lugar, los potenciales evocados son un eficaz medio que posibilita examinar la localización en el cerebro de una determinada función lingüística. Esta segunda aplicación nos permitirá elaborar un modelo del lenguaje en el cerebro.

Existen distintos aspectos del procesamiento lingüístico que se han vinculado a determinados componentes de los potenciales evocados (para una revisión, véase Friederici, 1998). Uno de ellos ya se ha comentado anteriormente. Nos referimos al componente N400 —onda negativa tardía que refleja la detección de una anomalía semántica por parte del sujeto y que se considera un indicador de la integración semántica de una palabra en un contexto previo. Si este componente se ha utilizado para indagar acerca del procesamiento semántico de los estímulos, tenemos otros que nos han permitido investigar otros procesos de carácter lingüístico como el procesamiento fonológico y el procesamiento sintáctico. Respecto al primero, se trata de un tipo de proceso cuyo estudio se ha desarrollado utilizando principalmente la MMN (Jaramillo *et al.*, 2001; Näätänen, 2001; Näätänen *et al.*, 1997; entre otros). En relación con el estudio del procesamiento sintáctico, se han identificado tres componentes vinculados a este tipo de procesos. Se trata del componente SPS y los componentes LAN y ELAN. El primero es una onda positiva tardía con latencia en torno a los 600 ms y topografía centroparietal que se manifiesta cuando se detecta una estructura sintácticamente incorrecta (Neville, Nicol, Barss, Forster y Garrett, 1991; Friederici, Pfeifer y Hahne, 1993; Osterhout y Mobley, 1995). Se considera que el componente SPS es un indicador de la revisión de la estructura sintáctica. Por lo que se refiere a los componentes LAN (Coulson *et al.*, 1998) y ELAN (Friederici *et al.*, 1993), se han encontrado en situaciones experimentales vinculadas al procesamiento sintáctico pero de tipo muy diverso, por lo que su naturaleza, esto es, el proceso cognitivo específico subyacente, todavía está por determinar.

Por lo que se refiere al estudio de los procesos emocionales, ya hemos co-

mentado que la aplicación del registro de potenciales evocados en este ámbito de la psicología es relativamente reciente. Posiblemente por este motivo todavía no se han identificado potenciales específicos para este tipo de procesos, si bien sí que se han encontrado resultados interesantes que animan a seguir investigando en este campo de investigación. En este sentido se ha demostrado que los estímulos que tienen connotaciones afectivas negativas provocan una respuesta emocional en el cerebro más rápida y más prominente que la estimulación positiva o neutra. Este hecho puede interpretarse como un reflejo de un mecanismo favorecido por la evolución que facilita una respuesta rápida e intensa ante los eventos aversivos (Carretié, Hinojosa y Mercado, 2003). Por lo que respecta a los estímulos positivos, se ha encontrado que también provocan una respuesta cerebral distinta de la que aparece ante la presentación de los estímulos negativos o neutros, aunque en este caso se trata de una respuesta más lenta que la que se ha asociado a los estímulos negativos (Carretié, Martín-Loeches, Hinojosa y Mercado, 2001). Estos resultados, y otros en la misma línea, animan a investigar el comportamiento de los PES en pacientes que sufren algún tipo de patología psicológica, puesto que podrían encontrarse patrones de respuesta emocional diferentes. Especialmente interesante sería estudiar grupos de personas que padecen patologías que afectan directamente a sus emociones, como es el caso de los trastornos bipolares.

Para concluir queremos destacar que los procesos cognitivos que hemos comentado en este artículo –atención, lenguaje y emociones– no son los únicos que se han beneficiado en los últimos años del uso de la técnica de registro de los PES. Procesos psicológicos como la memoria y el procesamiento de la información también se han investigado ampliamente, y otros, como la cognición numérica, se están comenzando a abordar a través de este tipo de medidas. En definitiva, entendemos que los PES han supuesto un considerable avance para incrementar los conocimientos en varias áreas de la psicología cognitiva, y, además, se revelan como un instrumento prometedor para aportar nuevas e interesantes contribuciones en el futuro.

REFERENCIAS

- Alain, C., Woods, D. L. & Knight, R. T. (1998). A distributed cortical network for auditory sensory memory in humans. *Brain Research*, 812, 23-37.
- Alho, K. (1995). Cerebral generators of mismatch negativity (MMN), and its magnetic counterpart (MMNm), elicited by sound changes. *Ear and Hearing*, 16, 38-51.
- Alho, K., Sainio, K., Sajaniemi, N., Reinikainen, K. & Näätänen, R. (1990). Event-related brain potential of human newborns to pitch change of an acoustic stimulus. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 77, 151-155.
- Allison, T., Wood, C. C. & McCarthy, G. M. (1986). The central nervous system. En M. G. H. Coles, E. Donchin & S. W. Porges (Eds.), *Psychophysiology: Systems, Processes, and Applications* (pp. 5-25). New York: Guilford.
- Barceló, F., Suwazono, S. & Knight, R. T. (2000). Prefrontal modulation of rapid extrastriate processing in humans. *Nature Neuroscience*, 3, 399-403.
- Brown, C. & Hagoort, P. (2000). On the electrophysiology of language comprehension: Implications for the human language system. En M. W. Crocker, M. Pickering & C. Clifton (Eds.), *Architectures and Mechanisms for Language Processing* (pp.213-237). Cambridge: Cambridge University Press.

- Brunia, C. H. M. (1993). Waiting in readiness: Gating in attention and motor preparation. *Psychophysiology*, *30*, 327-339.
- Carretié, L., Hinojosa, J. A. & Mercado, F. (2003). Cerebral patterns of attentional habituation to emotional visual stimuli. *Psychophysiology*, *40*, 381-388.
- Carretié, L., Martín-Loeches, M., Hinojosa, J. A. & Mercado, F. (2001). Emotion and attention interaction studied through event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18* (8), 1109-1128.
- Celsis, P., Boulanouar, K., Doyon, B., Ranjeva, J.P., Berry, I., Nespoulous, J. L. & Chollet, F. (1999). Differential fMRI responses in the left posterior temporal gyrus and left supramarginal gyrus to habituation and change detection in syllables and tones. *Neuroimage*, *9*, 135-144.
- Coles, M. G. H. & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. En M. D. Rugg & M. G. Coles (Eds.), *Electrophysiology of Mind: Event-related Brain Potentials and Cognition* (pp. 1-26). Oxford: Oxford University Press.
- Coles, M. G. H., Gratton, G. & Fabiani, M. (1990). Event-related potentials. En J. T. Caccioppo & L. G. Tassinay (Eds.), *Principles of Psychophysiology: Physical, Social, and Inferential Elements* (pp. 413-455). Cambridge: Cambridge University Press.
- Coulson, S., King, J. & Kutas, M. (1998). Expect the unexpected: Event-related brain responses of morphosyntactic violations. *Language and Cognitive Processes*, *13*, 21-58.
- Courchesne, E., Courchesne, R. Y. & Hillyard, S. A. (1978). The effect of stimulus deviation on P3 waves to easily recognized stimuli. *Neuropsychologia*, *16*, 189-199.
- Donchin, E., Ritter, W. & McCallum, C. (1978). Cognitive psychophysiology: The endogenous components of the ERP. En E. Callaway, P. Tueting & S. H. Koslow, *Brain Event-related Potentials in Man* (pp. 349-411). New York: Academic.
- Donchin, E., Karis, D., Bashore, T. R., Coles, M. G. H., & Gratton, G. (1986). Cognitive psychophysiology and human information processing. En M. G. H. Coles, E. Donchin, & S. W. Porges (Eds.), *Psychophysiology: Systems, processes, and applications* (pp. 244-267). New York: Guilford Press.
- Eggermont, J. J. & Ponton, C. W. (2002). The neurophysiology of auditory perception: From single units to evoked potentials. *Audiology & Neuro-Otology*, *7* (2), 71-99.
- Escera, C. (1996). El sistema atencional humano en audición: estudio con potenciales evocados. *Cognitiva*, *8*, 169-201.
- Escera, C. (1997). Potencial de disparidad (mismatch negativity): Características y aplicaciones. *Anuario de Psicología*, *72*, 63-80.
- Escera, C., Yago, E. & Alho, K. (2001). Electrical responses reveal the temporal dynamics of brain events during involuntary attention switching. *European Journal of Neuroscience*, *14*, 877-883.
- Escera, C., Alho, K., Schröger, E. & Winkler, I. (2000a). Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related brain potentials. *Audiology and Neuro-Otology*, *5*, 151-166.
- Escera, C., Alho, K., Winkler, I. & Näätänen, R. (1998). Neural mechanisms of involuntary attention to acoustic novelty and change. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *10*, 590-604.
- Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J. & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. En C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard & A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research* (pp. 192-195). The Netherlands: Tilburg UP.
- Friederici, A. (1998). The neurobiology of language comprehension. En A. Friederici (Ed.), *Language Comprehension: A biological perspective* (pp. 265-304). Berlin: Springer.
- Friederici, A., Pfeifer, E. & Hahne, A. (1993). Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic morphological and syntactic violations. *Cognitive Brain Research*, *1*, 183-192.
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M. & Gaeta, H. (2001). The novelty P3: An event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *25*, 355-373.
- Fuster, J. M. (1997). *The prefrontal cortex: Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe*. New York: Raven Press.
- Garnsey, S. (1993). Event-related brain potentials in the study of language: An introduction. *Language and Cognitive Processes*, *8* (4), 337-356.
- Gené-Cos, N., Ring, H. A., Pottinger, R. C. & Barrett, G. (1999). Possible roles for mismatch negativity in neuropsychiatry. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, *12*, 17-27.
- Giard, M. H., Perrin, F., Pernier, J. & Bouchet, P. (1990). Brain generators implicated in processing of auditory stimulus deviance: A topographic event-related potential study. *Psychophysiology*, *27*, 627-640.
- Giard, M. H., Lavikainen, J., Reinikainen, K., Perrin, F., Bertrand, O., Thévenet, M., Pernier, J. & Näätänen, R. (1995). Separate representation of stimulus frequency, intensity, and duration in auditory sensory memory. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *7*, 133-143.
- Gironell, A., Crusat, M., Rigau, E., García-Nonell, C., Velo, E., García-Sánchez, C. & Kulisevsky, J. (en

- prensa). Validación de la traducción a los idiomas catalán y castellano del potencial evocado cognitivo N400. *Neuología*.
- Gómez, C., Escera, C., Cilveti, R., Díaz, R. & Portavella, M. (1992). Localización neuroeléctrica de procesos cognitivos. *Anuario de Psicología*, 54, 77-96.
- Grillon, C., Courchesne, E., Ameli, R., Geyer, M. & Braff, D. L. (1990). Increased distractibility in schizophrenic patients. *Archives of General Psychiatry*, 47, 171-179.
- Hari, R., Hämäläinen, M., Ilmoniemi, R., Kaurokanta, E., Reinikainen, K., Salminen, J., Alho, K., Näätänen, R. & Sams, M. (1984). Responses of the primary auditory cortex to pitch changes in a sequence of tone pips: Neuromagnetic recordings in man. *Neuroscience Letters*, 50, 127-132.
- Harter, M. R. & Anlo-Vento, L. (1991). Visual-spatial attention: Preparation and selection in children and adults. En C. H. M. Brunia, G. Mulder & M. N. Verbaten (Eds.), *Event-related Potentials of the Brain (EEG Suppl. 42)* (pp. 183-194). Amsterdam: Elsevier.
- Hillyard, S. A., Picton, T. W. & Regan, D. (1978). Sensation, perception, and attention: Analysis using ERPs. En E. Callaway, P. Tueting & S. H. Koslow (Eds.), *Event-related Potentials in Man* (pp. 223-321). New York: Academic Press.
- Humphreys, D. G., & Kramer, A. F. (1994). Toward a psychophysiological assessment of dynamic changes in mental workload. *Human Factors*, 36, 3-22.
- Jacobsen, T. & Schröger, E. (2001). Is there pre-attentive memory-based comparison for pitch. *Psychophysiology*, 38, 723-727.
- Jaramillo, M., Ilvonen, T., Kujala, T., Alku, P., Tervaniemi, M. & Alho, K. (2001). Are different kinds of acoustic features processed differently for speech and non-speech sounds? *Cognitive Brain Research*, 12 (3), 459-466.
- Jasper, H. H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 10, 371-375.
- Kane, N. M., Curry, S. H., Butler, S. R. & Cummins, B. H. (1993). Electrophysiological indicator of awakening from coma. *Lancet*, 341, 688.
- Katayama, J. & Polich, J. (1998). Stimulus context determines P3a and P3b. *Psychophysiology*, 35, 23-33.
- Knight, R. T. (1984). Decreased response to novel stimuli after prefrontal lesions in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 59, 9-20.
- Kornhuber, H. H. & Deecke, L. (1965). Hirnpotentialänderungen bei Willkurbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers. Arch. Ges. Physiol.*, 284, 1-17.
- Kutas, H. & Dale, A. (1997). Electrical and magnetic readings of mental functions. En M. D. Rugg (Ed.), *Cognitive neuroscience* (pp. 197-242). Hove East Sussex, UK: Psychology Press.
- Kutas, M. & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 12 (4), 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, 161-163.
- Kutas, M. & Van Petten, C. (1994). Psycholinguistics electrified: Event-related brain potential investigations. En M. A. Gernsbacher (Ed.), *Handbook of Psycholinguistics* (pp. 83-143). San Diego, CA: Academic Press.
- Kutas, M., Lindamood, T. & Hillyard, S. A. (1984). Word expectancy and event-related brain potentials during sentence processing. En S. Kornblum & J. Roquin (Eds.), *Preparatory states and processes* (pp. 217-238). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Lovcless, N. E. & Sanford, A. J. (1974). Effects of age on the contingent negative variation and preparatory set in a reaction-time task. *Journal of Gerontology*, 29, 52-63.
- Mangun, G. R. & Hillyard, S. A. (1995). Mechanisms and models of selective attention. En M. D. Rugg & M. G. Coles (Eds.), *Electrophysiology of Mind: Event-related Brain Potentials and Cognition* (pp. 40-85). Oxford: Oxford University Press.
- Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Näätänen, R. (2001). The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the mismatch negativity (MMN) and its magnetic equivalent (MMNm). *Psychophysiology*, 38 (1), 1-21.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K. & Mantysalo, S. (1978). The N1 effect of selective attention reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313-329.
- Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M. et al. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, 385, 432-434.
- Neville, H. J., Nicol, J., Barss, A., Forster, K. I. & Garrett, J. F. (1991). Syntactically based sentence processing

- classes: evidence from event-related brain potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 3, 151-165.
- Niedeggen, M., Rösler, F. & Jost, K. (1999). Processing of incongruous mental calculation problems: Evidence for an arithmetic N400 effect. *Psychophysiology*, 36, 307-324.
- Nunez, P. L. (1981). *Electric fields of the brain*. New York: Oxford University Press.
- Nunez, P. L. (1990). Physical principles and neurophysiological mechanisms underlying event-related potentials. En J. W. Rohrbaugh, R. Parasuramen & R. Johnson (Eds.), *Event-related Brain Potentials* (pp. 19-36). New York: Oxford University Press.
- Núñez, M.I. (2001). *Análisis del componente N400: Estudio de diferentes formas de incongruencia*. Tesis doctoral no publicada, Universidad de Barcelona.
- Olivares, E., Bobes, M., Aubert, E. & Valdés-Sosa, M. (1994). Associative ERP effects with memories of artificial faces. *Cognitive Brain Research*, 2, 39-48.
- Opitz, B., Rinne, T., Mecklinger, A., von Cramon, D. Y. & Schröger, E. (2002). Differential contribution of frontal and temporal cortices to auditory change detection: fMRI and ERP results. *Neuroimage*, 15, 167-174.
- Osterhout, L. & Holcomb, P. J. (1992). Event-related brain potentials elicited by syntactic anomaly. *Journal of Memory and Language*, 31, 785-806.
- Osterhout, L. & Mobley, L. A. (1995). Event-related brain potentials elicited by failure to agree. *Journal of Memory and Language*, 34, 739-773.
- Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J., Besson, M. & Holcomb, P. J. (1998). Processing syntactic relations in language and music: An event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10 (6), 717-733.
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Millor, G. A., Ritter, W., Ruchkin, D. S., Rugg, M. D. & Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria. *Psychophysiology*, 37, 127-152.
- Picton, T. W., Lins, O. G. & Scherg, M. (1995). The recording and analysis of event-related potentials. En F. Boller & J. Grafman (Eds.), *The Handbook of Neuropsychology*, Volume 10. Amsterdam: Elsevier.
- Rinne, T., Alho, K., Ilmoniemi, R.J., Sinkkonen, J., Virtanen, J. & Näätänen, R. (2000). Separate time behaviors of the temporal and frontal MMN sources. *Neuroimage*, 12, 14-19.
- Rohrbaugh, J. & Gaillard, A. W. K. (1983). Sensory and motor aspects of the contingent negative variation. En A. W. K. Gaillard & W. Ritter (Eds.), *Tutorials in event-related potentials research: Endogenous components* (pp. 269-310). Amsterdam: North-Holland.
- Rudell, A. P. (1991). The recognition potential constructed with the P300. *International Journal of Neuroscience*, 60, 85-111.
- Sams, M., Hari, R., Rif, J. & Knuutila, J. (1993). The human auditory sensory memory trace persists about 10 ms: Neuromagnetic evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 363-370.
- Segalowitz, S. J. & Chevalier, H. (1998). Event-related potential (ERP) research in neurolinguistics: Part 1. Techniques and applications to lexical access. En B. Stemmer & H.A. Whitaker, (Eds.), *Handbook of neurolinguistics* (pp. 95-109). San Diego, CA: Academic Press, Inc.
- Sharbrough, F., Chatrian, G-E., Lesser, R. P., Lüders, H., Nuwer, M. & Picton, T. W. (1991). American Electroencephalographic Society Guidelines for Standard Electrode Position Nomenclature. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8, 200-2.
- Simons, R. F. (1988). Event-related slow brain potentials: A perspective from ANS psychophysiology. En P. I. Ackles, J. R. Jennings & M. G. H. Coles (Eds.), *Advances in Psychophysiology*, vol 3 (pp. 223-267). Greenwich, CT: JAI Press.
- Squires, N. K., Squires, K. C. & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38, 387-401.
- Stuss, D. T., Picton, T. W., Cerri, A. M., Leech, E. F. & Stethem, L. L. (1992). Perceptual closure and object identification: Electrophysiological responses to incomplete pictures. *Brain and Cognition*, 19, 253-266.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C. & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 230, 380-384.
- Winkler, I., Schröger, E. & Cowan, N. (2001). The role of large-scale memory organization in the mismatch negativity event-related brain potential. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 59-71.
- Wood, C. C. (1987). Generators of event-related potentials. En A. M. Halliday, S. R. Butler & R. Paul (Eds.), *A textbook of clinical neurophysiology* (pp. 535-567). New York: Wiley.
- Woods, D. L. (1992). Auditory selective attention in middle-aged and elderly subjects: An event-related brain potential study. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 84, 456-468.
- Yago, E., Escera, C., Alho, K. & Giard, M. H. (2001). Cerebral mechanisms underlying orienting of attention towards auditory frequency changes. *Neuroreport*, 12, 2583-2587.
- Yago, E., Escera, C., Alho, K., Giard, M. H. & Serra-Grabulosa, J. M. (2003). Spatiotemporal dynamics of the auditory novelty-P3 event-related brain potential. *Cognitive Brain Research*, 16 (3), 383-390.