

I **Influencia de la Asociación Estímulo-Respuesta sobre el Aprendizaje Secuencial y la Actividad Electrofisiológica**

Laura Maricela Barragán Hernández

Doctorado en Ciencia del
Comportamiento, Orientación
Neurociencia. Instituto de Neurociencias
de la Universidad de Guadalajara,
Jalisco, México.

Daniel Zarabozo Enríquez de Rivera

Laboratorio de Psicofisiología de
Procesos Perceptuales. Instituto de
Neurociencias de la Universidad de
Guadalajara. Jalisco, México.

Correspondencia: Laura Maricela Barragán
Hernández. Instituto de Neurociencias de la
Universidad de Guadalajara. Francisco de
Quevedo 180. Col. Arcos Vallarta. C.P.
44130 Jalisco, México. Correo electrónico:
lau23barra@gmail.com

Resumen

El objetivo de este estudio fue proporcionar datos conductuales y electrofisiológicos para probar la hipótesis de que el aprendizaje secuencial resulta de una asociación entre los estímulos y las respuestas. Se ha discutido si el aprendizaje secuencial se debe a procesos puramente motrices o perceptuales, pero esta hipótesis pretende probar que está implicado el proceso de selección de respuesta. En una Tarea de Tiempo de Reacción Serial comparamos la ejecución de dos grupos que tuvieron diferentes formas de asociación espacial entre los estímulos y las respuestas (compatible contra incompatible). Exploramos la influencia de estas condiciones sobre el reporte verbal del aprendizaje y sobre pruebas conductuales que intentan medir directamente qué se aprende de la secuencia (pruebas de generación). Buscamos registrar el componente *Negativity Error*, ya que ha sido relacionado con el proceso de selección de respuesta. Encontramos que la condición incompatible tuvo mayores efectos sobre el tiempo de reacción y sobre las pruebas de generación, así como un mayor reporte de aprendizaje. El registro electrofisiológico apuntó a que hay diferencias en los recursos neuronales implicados para el monitoreo y la selección de respuestas en las diferentes condiciones y en diferentes partes de la tarea.

Palabras clave: Aprendizaje secuencial, selección de respuesta, asociación entre estímulos y respuestas, *Negativity Error*.

Summary

The aim of this study was to provide behavioral and electrophysiological data to test the next hypothesis: the association between stimuli and responses explains sequential learning. The mainstream of the discussion has been whether sequential learning is due to purely motor processes or purely perceptual processes, but this hypothesis aims to prove that the response selection process is involved. In a Serial Reaction Time Task, we compared the performance of two groups that had different spatial correspondence between stimuli and responses (compatible versus incompatible). We explore the influence of these conditions on the verbal reporting of learning and on behavioral tests that attempt to measure directly what subjects learn from the sequence (generation tests). We seek to register the *Negativity Error* component, since it has been related to the response selection process. We found that the incompatible condition had greater effects on reaction time and generation tests, as well as a greater learning report. The electrophysiological recording pointed out that there are differences in the neural resources involved for the monitoring and selection of responses in the different conditions and in different parts of the task.

Keywords: Sequential learning, response selection, association between stimuli and responses, *Negativity Error*.

Introducción

El aprendizaje secuencial puede definirse como la capacidad para detectar secuencias o patrones en un ambiente que es dinámico. Un modelo experimental para

el estudio del aprendizaje secuencial es la *Tarea de Tiempo de Reacción Serial* (SRTT) de Nissen y Bullemer (1987). Esta tarea consiste en presionar lo más rápido y correctamente posible una tecla en particular para cada estímulo visual que se presenta, sin conocimiento de que los estímulos siguen un patrón.

El tiempo de reacción (TR) es la principal variable de la cual se infiere el aprendizaje secuencial, porque va disminuyendo conforme los participantes son expuestos repetidamente a la secuencia. Cuando se quita la secuencia y los estímulos se presentan aleatoriamente el TR aumenta, ya que el previo aprendizaje de la secuencia interfiere en la ejecución ante un nuevo orden de estímulos y esto requiere un mayor tiempo para ajustar la estrategia de respuesta.

Otras variables de las que se infiere el aprendizaje de la secuencia surgen del reporte verbal y de las pruebas de generación que se aplican al terminar la SRTT. Generalmente, hay un porcentaje de participantes que reporta haber observado una secuencia (de ellos se dice que aprendieron explícitamente) y otro porcentaje que no lo reporta (los que aprendieron implícitamente). Una forma de llevar a cabo las pruebas de generación consiste de dos partes. En la primera, la instrucción es generar el orden visto en los estímulos (prueba de inclusión) y en la segunda, la instrucción es generar un orden diferente al visto (prueba de exclusión). Los resultados de estas pruebas indican qué partes de la secuencia aprenden los participantes (lo cual se mide en número y longitud de *chunks*, que se definen como porciones de la secuencia generadas) y qué tanto pueden discriminar entre lo que aprendieron y el nuevo orden de estímulos

que deben generar (Buchner et al., 1997; Destrebecqz y Cleeremans, 2001; Perruchet y Amorim, 1992).

Ya se ha experimentado sobre la influencia de algunos factores en el aprendizaje secuencial durante la SRTT; desde factores como la edad, la escolaridad, el sexo (Aceves et al., 2018; Curran, 1997; Howard y Howard, 1989; Zarabozo et al., 2014) hasta variables que corresponden al diseño de la tarea como el tipo de secuencia, el tipo de estímulos, etcétera (Berriél, 2015; Cohen et al., 1990; Kemény y Luckács, 2011; Reed y Johnson, 1994; Shanks y Jonstone, 1999; Willingham et al., 1989). En la mayoría de estos estudios los efectos más consistentemente replicados conciernen al TR. El reporte verbal y las pruebas de generación (entre otros métodos para evaluar directamente el aprendizaje secuencial) no comparten esa consistencia ya que el porcentaje de participantes que aprenden la secuencia explícitamente es variable entre los diversos estudios. Esto podría deberse a que no hay un consenso sobre los métodos y los criterios para determinar el aprendizaje explícito.

En cuanto a los cambios del TR, Deroost y Soetens (2006) plantearon una explicación que tiene como base la teoría de la cronometría mental, específicamente el método de factores aditivos de Sternberg (1969). Dado que la discusión giraba en torno a si el aprendizaje se debía a un aspecto motor o a un aspecto perceptual (para una revisión de esta discusión: Schwarb y Schumacher, 2012), Deroost y Soetens propusieron una hipótesis que apelaba a un proceso intermedio: la selección de respuesta. Para probar esto experimentaron con un tipo de asociación o correspondencia compatible entre los

estímulos y las respuestas (a los estímulos localizados a la izquierda de la pantalla le correspondían respuestas de la izquierda del teclado, a los estímulos derechos correspondían respuestas derechas; es decir, la correspondencia era espacial) y esto lo contrastaron con un tipo de correspondencia indirecta o incompatible (a los estímulos de la izquierda de la pantalla correspondían respuestas de la derecha del teclado y viceversa). Observaron que en la condición compatible el TR era menor, pero en la condición incompatible la pendiente de disminución del TR era más pronunciada y en el bloque sin secuencia era mayor el aumento del TR. El indicador de aprendizaje secuencial específico que utilizaron fue la interacción significativa entre el factor compatibilidad y el factor secuencia.

Para los autores estos datos reflejaban que en la condición incompatible se favorecía más el aprendizaje, ya que en ésta el proceso de selección de respuesta debe ser más controlado dando origen al retraso de la respuesta, pero este retraso puede favorecer consolidando el aprendizaje. Lo anterior implica más un proceso cognitivo de selección de respuesta que procesos puramente perceptuales o motores. En un segundo experimento los autores manipularon la discriminabilidad de los estímulos para explorar si el proceso perceptual afectaba de la misma manera el TR, dado que no encontraron una interacción estadísticamente significativa entre la secuencia y la discriminabilidad, afirmaron que sólo el factor de la correspondencia entre los estímulos y las respuestas influía sobre el aprendizaje secuencial, señalando que futuros estudios podrían proporcionar más datos sobre esta hipótesis.

Si bien hay experimentos con Imagen por Resonancia Magnética Funcional (fMRI) que intentan ser complementarios (Schwarb y Schumacher, 2009), se sabe que la técnica de Potenciales Relacionados con Eventos (PREs) es especialmente útil para responder preguntas sobre el momento de los procesos mentales (Luck, 2014), ya que permite determinar qué etapas del procesamiento son afectadas por una manipulación experimental específica. Entre los múltiples PREs estudiados, se ha sugerido que el componente *Error-Negativity (NE)* puede reflejar, en parte, la etapa de la selección de respuesta (Falkenstein et al., 1991).

El componente *NE* tiene una polaridad negativa y se observa principalmente a partir de las respuestas erróneas (i.e., presionar una tecla que no corresponde con el estímulo objetivo). Generalmente, su latencia inicia milisegundos antes de que se ejecute la respuesta errónea y alcanza su máximo voltaje dentro de los 100 ms siguientes a una respuesta errónea (Gehring et al., 2018). La distribución del voltaje de *NE* es mayor en las zonas frontocentrales.

Por esta razón, registramos el componente *NE* durante las condiciones experimentales de compatibilidad e incompatibilidad entre estímulos y respuestas. También exploramos la influencia de estas condiciones sobre el reporte verbal y las pruebas de generación, ya que no fueron reportadas por otros autores previamente. El objetivo de esta investigación fue aportar datos conductuales y electrofisiológicos para probar la hipótesis de que el aprendizaje secuencial de la SRTT resulta de asociaciones entre los estímulos y respuestas.

Método

Participantes

Los participantes fueron 50 estudiantes de licenciatura (14 hombres) de 18 a 25 años de edad ($M = 21$), diestros, con visión normal o corregida y sin reporte de diagnóstico de enfermedad neurológica o psiquiátrica, a los que se ofrecieron puntos por su participación en el experimento. Cada uno fue aleatoriamente asignado a una u otra de las condiciones experimentales ($n_1 = n_2 = 25$) y todos realizaron la SRTT en un cubículo individual, aislado de ruidos externos. Para el análisis de los PREs y de las pruebas posteriores ($n_1 = n_2 = 17$) se excluyeron los participantes que cometieron menos de 10 errores por cada conjunto de cuatro bloques en la SRTT y aquellos cuyo registro EEG no pudo analizarse por la presencia de artefactos de movimiento o parpadeo. Antes de comenzar se les informó de los aspectos generales de la sesión y firmaron una carta de consentimiento informado, en la cual se explicó que el procedimiento era indoloro y cumplía con la aprobación del comité de ética del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara (Número del proyecto: ET062018-266).

Instrumentos

La actividad electroencefalográfica se registró con un equipo Medicid IV (*Neuronic*). La tarea fue programada con *PsychoPy2* (v 1.80.03) para el sistema operativo *Windows* (Peirce et al., 2019) y fue presentada en una pantalla de 22", situada a 60 cm frente a los participantes. Se utilizó un teclado *Qwerty*. El análisis estadístico se realizó con *SPSS* (v 21.0) y las gráficas con *SigmaPlot* (v 11.0). Para contar la longitud y el número de *chunks* de las pruebas de generación se desarrolló un *software* en el laboratorio de Psicofisiología

de Procesos Perceptuales del Instituto de Neurociencias.

- Estímulos de la SRTT y condiciones

Los estímulos fueron similares a los utilizados por Aceves et al. (2018): cuatro flechas (4 cm de largo, en blanco sobre fondo negro), indicadoras de una orientación espacial: flecha izquierda (estímulo A), flecha arriba (estímulo B), flecha abajo (estímulo C) y flecha derecha (estímulo D), presentadas en el centro de la pantalla. Los dedos medios e índices de ambas manos se distribuyeron sobre las teclas de respuesta: C, V, N, M. En la condición compatible se pidió responder de manera directa (con el dedo medio izquierdo a la flecha izquierda, el dedo índice izquierdo a la flecha hacia arriba, el dedo índice derecho a la flecha hacia abajo, el dedo medio derecho a la flecha derecha) y en la condición incompatible la instrucción fue responder de manera cruzada (con el dedo medio izquierdo a la flecha derecha, etc.). En cada ensayo el estímulo permaneció en el centro de la pantalla por un máximo 300 ms y fue seguido por un punto de fijación en el mismo lugar. La emisión de una respuesta fue requerida para avanzar al siguiente ensayo y se usó un intervalo respuesta-estímulo (RSI) de 500 ms. Se agruparon 120 ensayos en un bloque y al final de cada uno se permitió un descanso. La SRTT incluyó 10 bloques, pero el primero sólo fue introductorio (semialeatorio) y no se incluyó en el análisis de los datos. Los siete bloques siguientes (S1 a S7) tuvieron la siguiente secuencia de estímulos: D, B, A, C, A, D, C, B, D, A, C, B (repetida 10 veces por bloque), una secuencia de *primer orden condicional* (Reed y Johnson, 1994). Siguió un bloque de transferencia (BT: semialeatorio) y el último fue otra vez secuencial (S8). Cada

bloque secuencial inició en un punto diferente de la secuencia.

- Reporte verbal y pruebas de generación

Se realizaron seis preguntas abiertas para que el participante pudiera hacer un reporte verbal libre de la secuencia: 1) ¿Te pareció difícil la prueba?, 2) ¿Qué estrategia utilizaste para contestar?, 3) ¿Encontraste algo particularmente interesante a lo largo de la tarea?, 4) ¿Crees que conforme fuiste avanzando respondiste más rápido y más acertadamente?, 5) ¿A qué crees que se debió?, 6) El software asigna de manera aleatoria dos tipos de tarea, una en la que la mayoría de flechas se presentan de manera secuencial y otra en la que no. ¿Cuál crees que te tocó, la tarea con o sin secuencia? Las respuestas fueron registradas en una grabación con el consentimiento de los participantes.

Se aplicaron las pruebas de generación (con un ensayo de pista como punto de partida) siguiendo el *procedimiento de disociación de procesos* de Jacoby (1991). La instrucción en la prueba de inclusión fue generar lo observado en la SRTT, mientras que en la prueba de exclusión fue generar algo completamente diferente a lo observado. En ambas tareas se indicó que cuando se generaran 120 flechas, el software se detendría automáticamente. Se instruyó no repetir la misma tecla dos veces consecutivas. No se requirió responder rápido pero sí con exactitud.

- Registro electroencefalográfico

La frecuencia de muestreo fue de 250 Hz. Todas las derivaciones fueron en forma monopolar, referidas a los electrodos cortocircuitados de los lóbulos auriculares. Se atenuaron todas las frecuencias por debajo de 0.5 y por encima de 30 Hz en

todos los canales, y se mantuvo activo siempre un *Notch Filter* para atenuar las frecuencias de 60 Hz. Los electrodos se colocaron conforme al Sistema 10-20 Internacional en las derivaciones fronto centrales (Fz y Cz), donde se registra el pico del componente *NE*. Se colocaron dos electrodos más en las regiones infra y supraorbitales para registrar el electrooculograma vertical (EOGv). La impedancia de los electrodos se midió antes y después de iniciar la sesión experimental y todos los valores fueron menores a 10 k Ω .

Las ventanas de análisis fueron de 400 ms marcadas a partir de la ejecución de las respuestas (*response-locked averaged*) con una línea base de 100 ms. Se promediaron los segmentos de las respuestas incorrectas para obtener el componente *NE* (segmentos por grupo: $M = 60$, $DE = 19$) y se obtuvieron los segmentos de las respuestas correctas para comparar ($M = 60$, $DE = 19$). Para obtener los promedios del componente *NE* formamos dos conjuntos de bloques secuenciales: uno con S1 a S4 y otro con S5 a S8, con el objetivo de caracterizar los cambios electrofisiológicos durante el desarrollo del aprendizaje.

Resultados

Tiempo de reacción

El TR incluyó las respuestas correctas y las incorrectas, fue sometido a un Análisis de Varianza (ANOVA) Mixto. El factor entre grupos fue la correspondencia estímulo-respuesta (2 niveles: compatible e incompatible). El factor de medidas repetidas fue los bloques secuenciales consecutivos (7 niveles). Cuando el ANOVA resultó significativo se utilizaron pruebas

post hoc, y cuando no se cumplió con el supuesto de esfericidad se aplicó la corrección Greenhouse-Geisser, aunque los grados de libertad se reportaron con sus valores originales.

El efecto principal de la correspondencia [$F(1,48) = 8.33$, $p < 0.01$, $\eta^2 = .14$] indicó que el grupo incompatible tuvo un TR mayor en todos los bloques. Hubo un efecto principal de los bloques secuenciales [$F(6,288) = 37.43$, $p < 0.001$, $\eta^2 = .43$], es decir, en ambos grupos disminuyó el TR a lo largo de estos bloques. También se encontró una interacción significativa entre el tipo de correspondencia y los bloques secuenciales [$F(6,288) = 8.41$, $p < 0.001$, $\eta^2 = .14$], la condición incompatible mostró una pendiente más inclinada de disminución del TR. El análisis *post hoc* mostró que la diferencia entre los grupos fue estadísticamente significativa en los primeros cuatro bloques secuenciales (Figura 1-A).

Se realizó otro ANOVA mixto para evaluar el efecto del bloque de transferencia como un indicador más específico del aprendizaje secuencial. El factor entre grupos fue igualmente la correspondencia y el factor de medidas repetidas (2 niveles) fue el bloque de transferencia y el promedio de los bloques secuenciales adyacentes. Este análisis también arrojó un efecto principal de la correspondencia [$F(1,48) = 4.75$, $p < 0.05$, $\eta^2 = .09$]. Hubo un efecto principal de los bloques [$F(1,48) = 139.39$, $p < 0.001$, $\eta^2 = .74$] y una interacción significativa entre ambos factores [$F(1,48) = 4.89$, $p < 0.05$, $\eta^2 = .09$]. El cambio de la secuencia a una presentación semialeatoria de los estímulos afectó más el TR del grupo incompatible. El análisis *post hoc* mostró que la diferencia entre los grupos fue significativa en el bloque de transferencia.

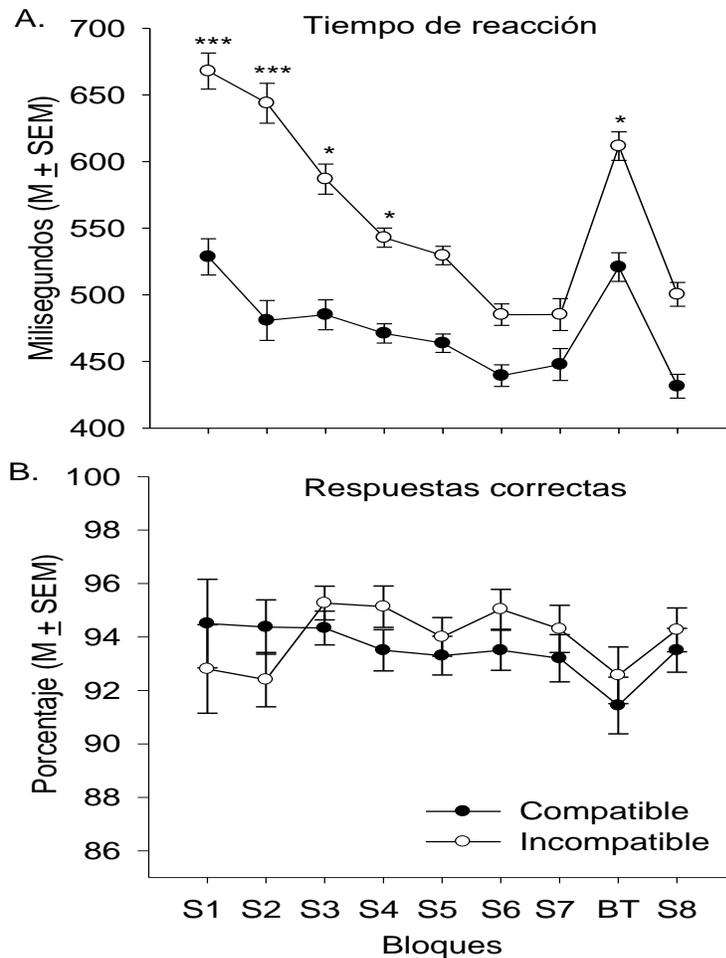
Porcentaje de respuestas correctas

El porcentaje de respuestas correctas (RC) se mantuvo alto, alrededor del 94%, y fue similar entre los grupos en los bloques secuenciales consecutivos. La Figura 1-B muestra una visible disminución de las RC en el bloque de transferencia en ambos grupos, se realizó un ANOVA mixto para corroborar si fue significativa. El factor entre grupos fue la correspondencia y el factor de

medidas repetidas fue el bloque de transferencia y el promedio de los bloques adyacentes. No hubo un efecto principal de la correspondencia. Sí se encontró un efecto principal significativo de los bloques [$F(1,48) = 0.52, p < 0.01, \eta^2 = .18$] por la disminución en el bloque de transferencia en ambos grupos, pero no hubo una interacción significativa entre la correspondencia y los bloques.

Figura 1

Resultados conductuales.



Nota. A. Promedio de medianas del tiempo de reacción total. B. Porcentaje promedio de respuestas correctas. S1 a S8: bloques secuenciales. BT: bloque de transferencia.

* $p < .05$. *** $p < .001$. ($n_1 = n_2 = 25$).

Reporte verbal

Los aprendices explícitos espontáneos son los que mencionaron haber notado una secuencia durante la SRTT o durante las primeras cinco preguntas (11 participantes en el grupo compatible y 13 en el incompatible). Los aprendices explícitos inducidos son los que respondieron que fueron asignados a una tarea con secuencia en la pregunta seis (4 participantes en el grupo compatible y 3 en el incompatible). Los implícitos respondieron que fueron asignados a una tarea que seguía un orden aleatorio (2 participantes en el grupo compatible y 1 en el incompatible).

Pruebas de generación

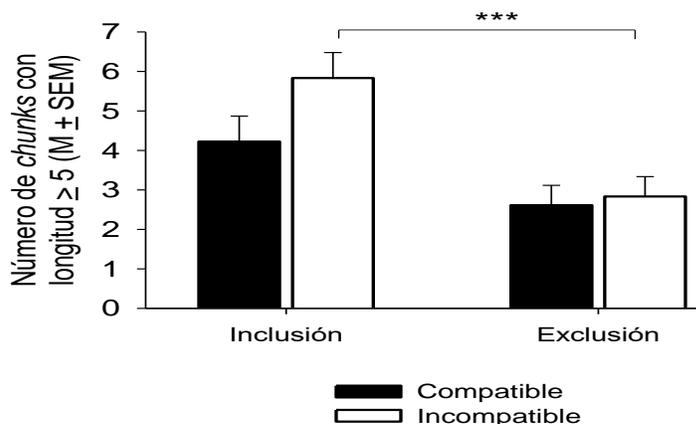
Las pruebas de generación se evaluaron mediante los *chunks*, que son las porciones de tres o más elementos de la secuencia que generaron. Se clasificaron los tipos de *chunks* (las diferentes partes de la secuencia), el número de veces que se generaron, su longitud (el número de elementos de la secuencia generada) y se agrupó el número de *chunks* por longitud.

Por ejemplo, un participante generó cuatro veces el *chunk*: D,A,C,B,D, cuya longitud es cinco; además, generó otro tipo de *chunk* cuya longitud es cinco (D,C,B,D,A) dos veces; entonces, en total generó seis *chunks* de longitud igual a cinco (otros sujetos generaron *chunks* de mayor longitud). Este procedimiento se hizo por cada sujeto y finalmente se obtuvieron los promedios.

Los promedios grupales del número de los *chunks* con longitud igual o mayor a cinco fueron sometidos a pruebas *t* de Student para muestras relacionadas, comparando la ejecución de la prueba de inclusión con la prueba de exclusión. Los resultados indicaron que el número de *chunks* generados por el grupo incompatible fue mayor en la prueba de inclusión ($M = 6$) que en la prueba de exclusión ($M = 2.82$), $t(16) = 4.89$, $p < .001$, $r = .75$ (Figura 2). En la prueba de inclusión el grupo incompatible generó un mayor número de *chunks* que el grupo compatible, pero esta diferencia no fue estadísticamente significativa. En la prueba de exclusión los grupos respondieron de manera semejante.

Figura 2

Resultados pruebas de generación.



Nota. Número de *chunks* generados con longitud ≥ 5 en la tarea de inclusión y en la tarea de exclusión. *** $p < .001$. ($n_1 = n_2 = 17$).

Relación entre TR, RC y chunks generados

Para analizar si las porciones más generadas de la secuencia correspondían a los elementos con mayor disminución del TR, o con cambios en las RC durante la SRTT, se realizó el siguiente procedimiento. Se agruparon los datos (TR y RC) de diferentes partes de la secuencia y se contrastaron entre los bloques S1 y S7. En la Tabla 1 se muestra la secuencia segmentada en todas las posibles triadas

que forman sus elementos y el número de veces que cada grupo generó esas triadas en las pruebas de inclusión y exclusión (para más detalles sobre cómo se obtienen las triadas véase, Perruchet y Amorim, 1992; Reed y Johnson, 1994). La fila sombreada superior muestra la *Triada Poco Generada* (TPG, en adelante) y la fila sombreada inferior muestra la *Triada Más Generada* (TMG, en adelante).

Tabla 1

Triadas posibles de la secuencia en orden alfabético y número de veces que cada grupo las generó en las pruebas de inclusión y exclusión. $n_1=n_2=17$. Fila sombreada superior: Triada Poco Generada. Fila sombreada inferior: Triada Más Generada***

Triadas	COMPATIBLE		INCOMPATIBLE	
	Inclusión	Exclusión	Inclusión	Exclusión
ACA*	10	7	16	12
ACB	63	51	66	43
ADC	37	30	49	35
BAC	29	21	36	27
BDA	31	41	40	27
BDB	12	11	20	19
CAD	24	27	35	31
CBD**	69	59	78	46
DAC	48	51	55	38
DBA	25	22	29	25
DCB	45	37	57	37
Total suma:	393	357	481	340

El TR de las triadas fue sometido a pruebas *t de Student* para muestras relacionadas (Figura 3-A). Desde el bloque S1 el grupo incompatible tuvo un menor TR en la TMG ($M = 737.84$) que en la TPG ($M = 807.33$). Mientras que el grupo compatible tuvo un TR similar para los dos tipos de triadas. En el bloque S7 ambos grupos respondieron significativamente más rápido a la TMG. Pero el grupo incompatible tuvo una mayor

diferencia, tuvo un menor TR en la TMG ($M = 513.22$) que en las TPG ($M = 604.86$); $t(16) = 3.45, p < .01, r = .81$.

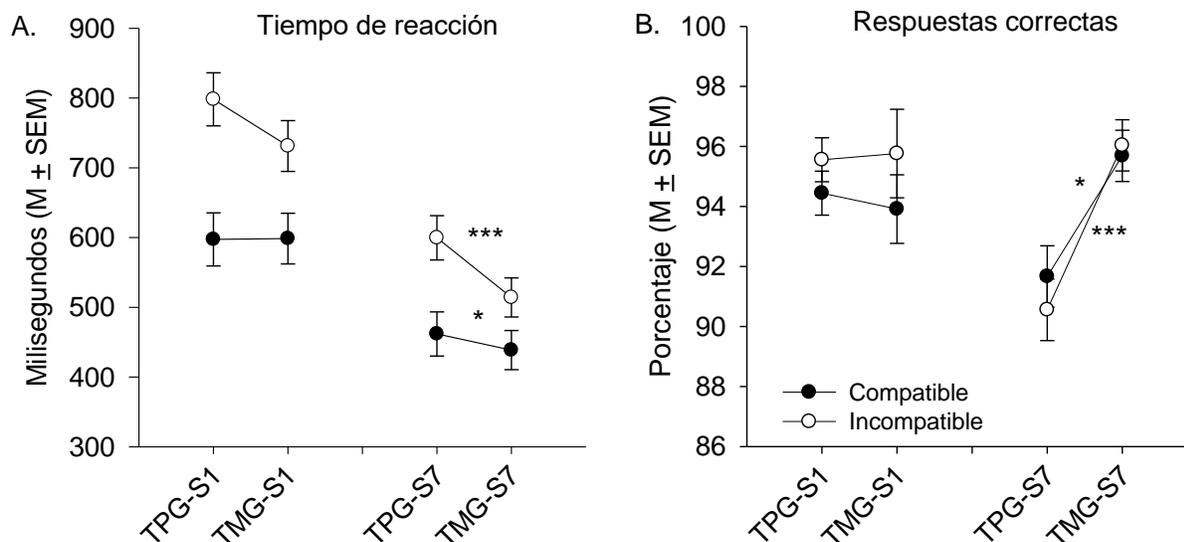
Las RC de las triadas también fueron sometidas a pruebas *t de Student* para muestras relacionadas (Figura 3-B). En el bloque inicial no se encontraron diferencias significativas, ambos grupos mostraron un porcentaje alto de RC ($M = 95$) sin una tendencia clara debido a la variabilidad.

Pero algo interesante se observó en el bloque S7, el porcentaje de RC fue mayor en lo *chunks* más generados en ambos grupos (en promedio disminuyó al 91.11%), el porcentaje de RC en las TMG ($M =$

95.86) fue significativamente mayor en ambos grupos [compatible: $t(16) = -2.62, p < .05, r = .33$; incompatible: $t(16) = -3.90, p < .001, r = .42$].

Figura 3

Relación entre resultados conductuales y pruebas de generación



Nota. A. Tiempo de reacción, promedio de medianas. B. Porcentaje promedio de respuestas correctas. TPG: triadas poco generadas. TMG: triadas más generadas. S1: primer bloque secuencial; S7: séptimo bloque secuencial. * $p < .05$. *** $p < .001$. ($n_1 = n_2 = 17$).

Resultados electrofisiológicos

Los grandes promedios de las ondas relacionadas con los errores mostraron una morfología consistente en ambos grupos. En primer lugar, se observó una deflexión negativa que corresponde al componente *NE*, cuya latencia inició alrededor de los 30 ms antes de la ejecución de la respuesta y terminó alrededor de los 100 ms posterior a ésta. En segundo lugar, se observó una deflexión positiva que no fue prevista y que corresponde al componente *PE (Positivity Error)*, cuya latencia fue distinta entre los grupos, pero en general inició a partir de los

100 ms posteriores a la respuesta y llegó casi hasta los 300 ms.

También obtuvimos las ondas relacionadas con las respuestas correctas, pero no las analizamos estadísticamente. La morfología de estas ondas no fue homogénea entre los grupos ni en entre las derivaciones. Encontramos una pequeña deflexión negativa alrededor de la ejecución de la respuesta que corresponde al *Correct-Related Negativity (CRN)* solamente en el grupo incompatible. Mientras que el grupo compatible mostró un voltaje positivo alrededor de los 50 ms posteriores a la

ejecución de la respuesta.

La amplitud y la latencia del pico local del componente *NE* fueron sometidas a un ANOVA mixto, el factor entre grupos fue la correspondencia (2 niveles), un factor intragrupo fue la derivación (2 niveles: Fz y Cz) y otro factor intragrupo fue de medidas repetidas: el conjunto de bloques (2 niveles: S1-S4 y S5-S8).

La amplitud del componente *NE* fue visiblemente mayor en el grupo incompatible (Figura 4), pero el efecto principal de la correspondencia no fue significativo. Por otra parte, hubo un efecto principal de la derivación [$F(1,32) = 50.91, p < .001, \eta^2 = .61$] así como un efecto principal del conjunto de bloques [$F(1,32) = 7.80, p < .01, \eta^2 = .19$]. En ambos grupos la amplitud fue mayor en Cz y en el primer conjunto de bloques ($M = -5.79$ en el grupo compatible; $M = -6.22$ en el incompatible). La interacción entre la correspondencia, la

derivación y el conjunto de bloques no fue significativa.

La latencia del componente *NE* también fue visiblemente mayor en el grupo incompatible y hubo un efecto principal de la correspondencia [$F(1,32) = 18.94, p < .001, \eta^2 = .37$]. También se encontró un efecto principal del conjunto de bloques [$F(1,32) = 25.88, p < .001, \eta^2 = .44$] y una interacción significativa entre la correspondencia, el conjunto de bloques y la derivación [$F(1,32) = 6.37, p < .05, \eta^2 = .16$]. El análisis *post hoc* mostró que la latencia del grupo compatible ($M = 21.88, SE = 1.88$) fue significativamente menor que la del incompatible ($M = 39.29, SE = 1.88$) en Cz y en el primer conjunto de bloques. También mostró que latencia fue significativamente mayor en el segundo conjunto de bloques en ambos grupos y en la derivación Fz.

Discusión

Con este experimento se replicaron los efectos de la correspondencia entre estímulos y respuestas sobre el aprendizaje secuencial: a) un mayor TR en la condición incompatible durante toda la tarea; b) una mayor pendiente de disminución del TR en la condición incompatible; c) un mayor efecto de transferencia (mayor incremento del TR en el bloque de transferencia); y d) una interacción estadísticamente significativa entre el factor secuencia y el factor correspondencia. Estos datos concuerdan con los que obtuvieron Deroost y Soetens (2006).

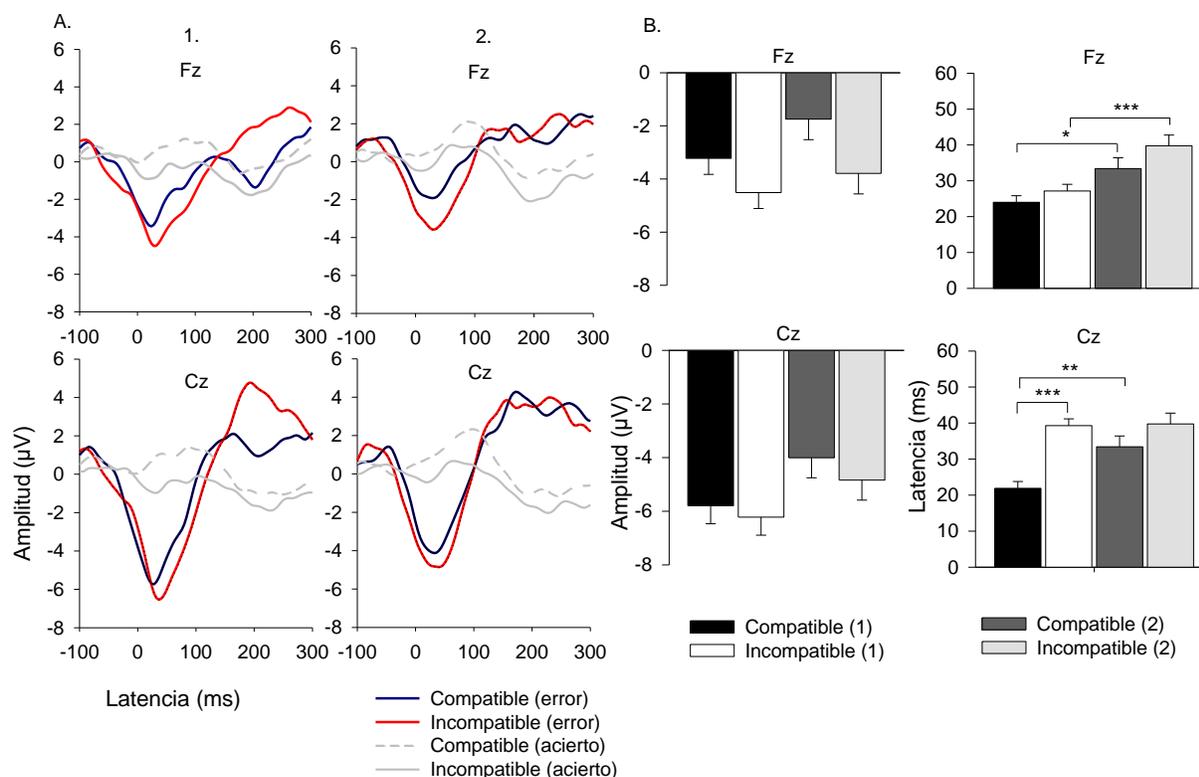
Dichos autores argumentaron que el TR de la condición incompatible refleja una mayor implicación del proceso de selección de

respuesta, el cual favorece el aprendizaje. En su experimento utilizaron estímulos localizados en diferentes posiciones de una pantalla. En cambio, en nuestra tarea utilizamos flechas en el centro de la pantalla, porque Berriel (2015) mostró que estos estímulos tenían el mismo efecto que los ubicados en diferentes posiciones, particularmente debido a las flechas de derecha e izquierda. Los estímulos que tienen una correspondencia espacial con las respuestas presentan este patrón denominado *Efecto Simon*; el cual establece que el TR suele ser menor y las reacciones tienden a ser más acertadas cuando el estímulo ocurre en la misma ubicación que la respuesta, incluso si la ubicación del estímulo es irrelevante para realizar la tarea. Esto se debe a que hay una tendencia natural (o automática) de reaccionar frente a la fuente de la

estimulación, a lo que también se le denomina *reflejo orientado* (Simon, 1969). El menor TR de la condición compatible podría explicarse por el efecto Simon y el

mayor TR de la condición incompatible, por su parte, podría explicarse por la inhibición de esta tendencia automática de responder frente a la fuente de la estimulación.

Figura 4
Resultados electrofisiológicos



Nota. A. Ondas relacionadas con las respuestas. Grandes promedios en dos conjuntos de bloques. El cero del eje horizontal indica el inicio de la respuesta. B. Amplitud y latencia pico del componente NE. 1. Primer conjunto de bloques secuenciales: S1 a S4. 2. Segundo conjunto de bloques secuenciales: S5 a S8.

* $p < .05$. ** $p < .01$. ($n_1=n_2=17$).

La interferencia del aprendizaje secuencial no sólo se vio reflejada en el TR sino también en las RC. Aceves et al. (2018) argumenta que durante la tarea se enganchan mecanismos atencionales que fortalecen una cadena responsiva estímulo-respuesta. A la vez que esa cadena se fortalece, se vuelve más independiente de

la estimulación externa y el individuo puede reaccionar más rápido al siguiente estímulo. El bloque de transferencia representa un nuevo contexto para el proceso de selección de respuesta que interfiere con la generación de una respuesta ya adquirida y que se volvió rápida; los participantes deben inhibir la respuesta de su previo

aprendizaje, deben abolir la estrategia que desarrollaron y adoptar un nuevo acercamiento al problema, en el proceso de la adquisición de una nueva estrategia la precisión de las respuestas decae, así como la velocidad de reacción.

Con esta investigación buscamos añadir datos conductuales sobre los efectos de la correspondencia en el aprendizaje. Por esta razón registramos el reporte verbal, aplicamos las pruebas de generación y analizamos la relación entre éstas y la SRTT. Encontramos que el grupo incompatible tuvo más participantes que reportaron haber notado la secuencia y que lograron discriminar significativamente entre las partes de la secuencia que aprendieron y el orden diferente de estímulos que generaron. Un aspecto que podría haber favorecido la ejecución de las pruebas de generación y el reporte verbal es el RSI de 500 ms que se empleó. Destrebecqz y Cleeremans (2001) mostraron que si el tiempo entre la ejecución de la respuesta y la presentación del siguiente estímulo es mayor a 250 ms, aumenta la probabilidad de que este tiempo sirva a los participantes para notar los patrones en la tarea.

Encontramos que los *chunks* más generados en las pruebas de inclusión correspondían a los elementos de la secuencia que menor TR mostraron durante la SRTT. Esto ocurrió en los dos grupos experimentales, pero el grupo incompatible tuvo esa disminución en el TR desde el primer bloque secuencial. Nissen y Bullemer (1987) también llevaron a cabo un análisis minucioso del TR y observaron que ocurría una disminución significativa desde la séptima repetición de la secuencia en el primer bloque (S1), en comparación con una condición aleatoria. En el caso de este estudio, observamos que el aprendizaje se

favoreció en la condición incompatible. Una posible interpretación de esto radica en los mayores recursos de atención empleados cuando no se dispone de información espacial que permita el reflejo orientado propuesto por Simon (1969).

Además, se encontró que el menor porcentaje RC también mostraban una relación con los elementos más generados en la prueba de inclusión. Estos datos apuntan que la variable de RC sí es sensible al efecto de interferencia, con la particularidad de que no sólo el bloque de transferencia representó un cambio en la secuencia para algunos participantes, ya que reportaron ver dentro de cada bloque un patrón en los estímulos con algunos elementos aleatorios. El patrón que pudieron identificar dentro de los bloques secuenciales pudo haber sido el correspondiente a las triadas más generadas y los estímulos aleatorios pudieron ser los correspondientes a las triadas menos generadas. Una prueba de reconocimiento en papel o en computadora podría corroborar esta hipótesis.

Las partes de la secuencia que fueron más recordadas por los sujetos se relacionaron con una disminución en el TR y las partes menos recordadas se correspondieron con una disminución en las RC, esto podría atribuirse a las características del tipo de secuencia que se utilizó. Reed y Johnson (1994) mostraron que las secuencias de primer orden (como la de este estudio) son más sencillas que las de segundo orden, porque tienen ciertas frecuencias de información que facilitan que el participante perciba un patrón. Al repetirse la triada de estímulos C, B, D dos veces en la secuencia es posible que los participantes percibieran estos elementos como el patrón

de la SRTT, en lugar la secuencia de 12 elementos que utilizamos.

Otro de nuestros objetivos fue proporcionar datos electrofisiológicos y encontramos que la morfología de las ondas relacionadas con los errores presentó una deflexión negativa correspondiente al componente *NE*, pero además se presentó un pico positivo no previsto correspondiente al *PE*. En cuanto al componente *PE*, se ha propuesto que refleja un proceso disociable del componente *NE*. La onda *PE* podría reflejar la parte consciente de la detección del error. Entre los experimentos que aportan datos sobre esta idea está el de Endrass et al. (2007), Nieuwenhuis et al. (2001) y Ridderinkhof et al. (2009). Pero hay otros que atribuyen esta función al componente *NE*, entre ellos Maier et al. (2008), Scheffers y Coles (2000) y Wessel et al. (2011). La interpretación y la disociación entre estos componentes todavía está en discusión.

En las ondas relacionadas con los aciertos, por su parte, se mostró una deflexión negativa en el grupo incompatible que corresponde al *CRN*. Esta deflexión negativa en las respuestas correctas podría explicarse de la siguiente manera. El experimentador define qué es un error y generalmente consiste en no seguir una instrucción. En la SRTT se presentan varias instrucciones que deben ser atendidas simultáneamente, los errores cometidos podrían deberse al conflicto de prioridad sobre las instrucciones. Cuando en un momento dado los participantes saben que no están siguiendo la instrucción que ellos priorizan, saben que en ese momento están cometiendo un error. Es decir, el componente *NE* surge sólo cuando el error es definido por el participante. Es posible que algunos participantes hayan

considerado que se equivocaron en algunos ensayos en los que contestaron correctamente (Gehring et al., 2012). Y al revés, cuando hay un *NE* de baja amplitud, se puede inferir que el participante no consideró que estaba cometiendo un error en algunos donde sí se equivocó.

Encontramos que la amplitud y la latencia del componente *NE* se vieron afectadas tanto por el tipo de correspondencia entre estímulos y respuestas, como por el desarrollo del aprendizaje a lo largo de la tarea. Se pronosticaba que, si la modulación de la amplitud pico de *NE* estaba relacionada con el control de la selección de respuesta (como lo proponían Falkenstein et al., 1991), entonces la amplitud sería mayor en el grupo incompatible, y nuestros resultados mostraron esta tendencia.

La latencia pico del componente *NE* fue significativamente mayor en el grupo incompatible. En general, se espera que exista una asociación entre la rapidez de la respuesta y el solapamiento temporal entre los distintos procesos cerebrales requeridos para la misma (Paz y Muñiz, 1989). El TR del grupo incompatible es mayor y esto es consistente con su latencia, lo cual era esperado por lo que sostiene la teoría de la cronometría mental (Coles et al., 1996). Este dato aunado a que la amplitud fue notoriamente mayor en el grupo incompatible, podrían ser aproximaciones electrofisiológicas de que el proceso de selección de respuesta requiere más control y más tiempo en dicha condición experimental.

El hecho de que el promedio de la amplitud disminuyó en el segundo conjunto de bloques con respecto del primero en ambos grupos podría explicarse en relación con uno de los datos más sólidos o replicables

sobre el componente *NE*, que su amplitud se modula por el énfasis en la instrucción de responder correctamente, en comparación con el énfasis en responder rápidamente (Gehring et al., 1993, 2012, 2018). En la SRTT se hizo énfasis en las dos instrucciones: responder rápida y correctamente. Pero es posible que en la condición incompatible sea necesario que los participantes estén más atentos a responder correctamente que a responder rápidamente. Del mismo modo hay un mayor énfasis en responder correctamente en ambos grupos al inicio de la tarea (en el primer conjunto de bloques) en comparación con el final (el segundo conjunto de bloques). El control en la ejecución de la tarea podría ser mayor al principio y cuando se va adquiriendo el aprendizaje, se tiene menor énfasis en vigilar la exactitud de las respuestas. El decaimiento de la atención sostenida podría explicar la disminución de la amplitud en el segundo conjunto de bloques, aunque se requiere más trabajo experimental sobre este punto.

En conclusión, podemos afirmar que el aprendizaje secuencial se desarrolla en cualquier condición de correspondencia espacial entre estímulos y respuestas, pero en la condición incompatible se favorece el aprendizaje y esto no sólo lo marca el tiempo de reacción, sino también el reporte verbal y las pruebas de generación. Los datos electrofisiológicos muestran una tendencia sobre las diferencias entre los recursos neuronales implicados en las dos condiciones experimentales, lo que podría estar relacionado con el proceso de selección de respuesta. Sugerimos que otro componente podría ser registrado, el *Lateralized Readiness Potential (LRP)*, ya que también ha sido relacionado con la

selección de respuesta. Los cambios encontrados en la latencia son consistentes con los cambios en el tiempo de reacción e implican una relación con la temporalidad de los procesos implicados. Los cambios en la amplitud durante las dos partes de la tarea podrían ser sometidos a más controles para determinar si en la SRTT también hay un efecto del énfasis en la velocidad o en la exactitud durante las instrucciones.

Referencias

- Aceves, N., Zarabozo, D., Martínez, H., García, M., y Parra, I. (2018). Retroalimentación, recompensa y castigo: Efectos sobre el aprendizaje secuencial. *Conductual*, 6(1), 37-52. <http://conductual.com/content/retroalimentaci%C3%B3n-recompensa-y-castigo-efectos-sobre-el-aprendizaje-secuencial>
- Berriell, P. (2015). *Influencia del modo de presentación de los estímulos y de la longitud de la secuencia en el aprendizaje de patrones*. [Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara]. DSpace. <http://biblioteca.cucba.udg.mx:8080/xmlui/handle/123456789/5898>
- Buchner, A., Steffens, M., Erdfelder, E., y Rothkegel, R. (1997). A multinomial model to assess fluency and recollection in a sequence learning task. *Journal of Experimental Psychology*, 50(3), 631-663. <https://doi.org/10.1080/713755723>
- Cohen, A., Ivry, R. y Keele, S. (1990). Attention and structure in sequence learning. *Journal of Experimental Psychology*, 16(1), 17-30. <http://doi.org/10.1037/0278-7393.16.1.17>

Coles, M., Smid, H., Scheffers, M. y Otten, L. (1996). Mental chronometry and the study of human information processing. In M. Rugg & M. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind: Even-related brain potentials and cognition* (pp. 86-124). Oxford University Press. <http://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198524168.001.0001>

Curran, T. (1997). Effects of aging on implicit sequence learning: Accounting for sequence structure and explicit knowledge. *Psychological Research*, 60(1-2), 24-41. <http://doi.org/10.1007/BF00419678>

Deroost, N., y Soetens, E. (2006). The role of response selection in sequence learning. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(3), 449-456. <http://doi.org/10.1080/17470210500462684>

Destrebecqz, A., y Cleeremnas, A. (2001). Can sequence learning be implicit? New evidence with the process dissociation procedure. *Psychonomic Bulletin & Review*, 343-350. <https://doi.org/10.3758/BF03196171>

Endrass, T., Reuter, B. y Kathmann, N. (2007). ERP correlates of conscious error recognition: Aware and unaware errors in an antisaccade task. *European Journal of Neuroscience*, 26(6), 1714-1720. <http://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2007.05785.x>

Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J. y Blanke, L. (1991). Effects of crossmodal divided attention on late ERP components. II. Error processing in choice reaction tasks. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 78(6), 447-455.

[http://doi.org/10.1016/0013-4694\(91\)90062-9](http://doi.org/10.1016/0013-4694(91)90062-9)

Gehring, W., Goss, B., Coles, M., Meyer, D., & Donchin, E. (2018). The error-related negativity. *Perspectives on Psychological Science*, 13(2), 200-204. <http://doi.org/10.1177/1745691617715310>

Gehring, W., Goss, B., Coles, M., Meyer, D. y Donching, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological science*, 4(6), 385-390. <http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1993.tb00586.x>

Gehring, W., Liu, Y., Orr, J. y Carp, J. (2012). The error-related negativity (ERN/Ne). In S. Luck & E. Kappenman (Eds.), *The Oxford handbook of event related potentials components* (pp. 231-291). Oxford University Press. <http://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0120>

Howard, D. y Howard, J. (1989). Age differences in learning serial patterns: Direct versus indirect measures. *Psychology and Aging*, 4(3), 357-364. <http://doi.org/10.1037/0882-7974.4.3.357>

Jacoby, L. (1991). A Process dissociation framework: separating automatic from intentional uses of memory. *Journal of Memory and Language*, 30(5), 513-541. [http://doi.org/10.1016/0749-596X\(91\)90025-F](http://doi.org/10.1016/0749-596X(91)90025-F)

Kémeny, F. y Luckás, Á. (2001). Perceptual effect on motor learning in the serial reaction-time task. *The Journal of General Psychology*, 138(2), 110-126. <http://doi.org/10.1080/00221309.2010.542509>

Luck, S. (2014). *An Introduction to the event related potential technique*. Massachusetts Institute of Technology.

Maier, M., Steinhauser, M. y Hübner, R. (2008). Is the error-related negativity amplitude related to error detectability? Evidence from effects of different error types. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(12), 263-2273. <http://doi.org/10.1162/jocn.2008.20159>

Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, R., Blom, J., Band, G. y Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38(5), 752-760. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3850752>

Nissen, M. y Bullemer, P. (1987). Attentional requirements of learning: Evidence from performance measures. *Cognitive Psychology*, 19, 1-32. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90002-8)

Paz, M. D. y Muñoz, J. (1989). Potenciales evocados y tiempo de reacción. *Psicothema*, 1(2), 97-106. <http://www.psicothema.com/pdf/638.pdf>

Peirce, J., Gray, J., Simpson, S. M., Kastman, E. y Lindeløv, J. (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51(1), 195-203. <http://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>

Perruchet, P., y Amorim, M. (1992). Conscious knowledge and changes in performance in sequence. *Journal of*

Experimental Psychology, 18(1), 785-800. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.18.4.785>

Reed, J. y Johnson, P. (1994). Assessing implicit learning with indirect test: Determining what is learned about sequence structure. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 20(3), 585-594. <http://doi.org/10.1037/0278-7393.20.3.585>

Ridderinkhof, K., Ramautar, J., & Wijnen, J. (2009). To P(E) or not ro P(E): A P3-like ERP component reflecting the processing of response errors. *Psychophysiology*, 46(3), 531-538. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00790.x

Scheffers, M. y Coles, M. G. (2000). Performance monitoring in a confusing world: Error-related brain activity, judgments of response accuracy, and types of errors. *Journal of Experimental Psychology*, 26(1), 141-151. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.26.1.141>

Schwarb, H. y Schumacher, E. (2009). Neural evidence of a role for spatial response selection in the learning of spatial sequences. *Brain Research*, 1247, 114-125. <http://doi.org/10.1016/j.brainres.2008.09.097>

Schwarb, H. y Schumacher, E. (2012). Generalized lessons about sequence learning from the study of the serial reaction time task. *Advances in Cognitive Psychology*, 8(2), 155-178. <http://doi.org/10.2478/v10053-008-0113-1>

Shanks, D., & Johnstone, T. (1998). Implicit knowledge in sequential learning tasks. En M. Stadler, & P. Frensch, *Handbook of*

implicit learning (págs. 533-572). Thousand Oaks CA: Sage Publications.

Simon, J. (1969). Reactions toward the source of stimulation. *Journal of Experimental Psychology*, 81(1), 174-176. <http://doi.org/10.1037/h0027448>

Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: extensions of Donders' method. *Acta Psychologica Attention and Performance*, 11(30), 276-315

Wessel, J., Danielmeier, C. y Ullsperger, M. (2011). Error awareness revisited: Accumulation of multimodal evidence from central and autonomic nervous systems. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(10), 3021-3036. <http://doi.org/10.1162/jocn.2011.21635>

Willingham, D., Nissen, M., y Bullemer, P. (1989). On the development of procedural knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15(6), 1047-1060. <http://doi.org/10.1037/0278-7393.15.6.1047>

Zarabozo, D., López, M., Aceves, N., y Madera, H. (2014). Aprendizaje Secuencial en Niños de 7 a 12 años de escuelas públicas y privadas. *Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias*, 14(1), 23-39. <https://revistannn.files.wordpress.com/2014/07/aprendizaje-secuencial-en-nic3b1os-de-7-a-12-ac3b1os-de-escuelas-pc3bablicas-y-privadas-daniel-zarabozo-minerva-lc3b3pez-alvarez-nayamin-aceves-ortega-humberto-madera-carrillo.pdf>