

Aprender de uno y de los otros: correlatos neurofisiológicos de la monitorización propia y vicaria del desempeño

Erwin R. Villuendas González

Facultad de Psicología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Laboratorio de Neurofisiología Clínica, Instituto de Neurociencias, Universidad de Guadalajara.

Andrés A. González Garrido

Laboratorio de Neurofisiología Clínica, Instituto de Neurociencias, Universidad de Guadalajara. Antiguo Hospital Civil de Guadalajara "Fray Antonio Alcalde"

Correspondencia:

Laboratorio de Neurofisiología Clínica. Instituto de Neurociencias. Universidad de Guadalajara. Francisco de Quevedo 180, Col. Arcos Vallarta. Guadalajara, Jal. MÉXICO. C.P. 44130. Correo electrónico:

erwinvilluendas@gmail.com

gonzalezgarrido@gmail.com

Resumen

La monitorización del desempeño se ha estudiado principalmente desde una perspectiva conductual. Posterior a Rabbitt (60s), quien describió cambios en la velocidad de respuesta después de cometer errores, muchas investigaciones han propuesto un modelo descrito como mecanismo de detección de errores, o en sentido más amplio, sistema para la monitorización del desempeño. En contraste, el estudio de la monitorización vicaria (detección de los errores de los otros) no ha sido exhaustivo. La existencia de un mecanismo de detección de errores ha recibido suficiente sustento empírico, describiéndose correlatos neurofisiológicos de los errores durante la ejecución de tareas experimentales usando Potenciales Relacionados con Eventos (PREs), en forma de componentes relacionados: Negatividad relacionada con el Error (ERN o Ne); Positividad relacionada con el error (Pe); Negatividad relacionada con la retroalimentación (FRN) y la P3 relacionada con retroalimentación (FP300), entre otros. Varios componentes (obtenidos a partir del desempeño propio) han sido evaluados a partir del desempeño ajeno y descrito sus correspondientes "observacionales". El estudio del aprendizaje observacional se ha beneficiado sustancialmente del

estudio de las diferencias y similitudes neurofisiológicas y neuroanatómicas entre la monitorización propia y la vicaria. Esta revisión discute correlatos neurofisiológicos de la monitorización propia y vicaria intentando sistematizar los datos de experimentos recientes. Existen distintos modelos de la monitorización del error (detección de errores, detección del conflicto, sistema de recompensas), aunque es probable que exista un sistema complejo que integre aspectos de cada uno, por lo que los estudios de monitorización vicaria contribuirían a construir un modelo integral de estos fenómenos. *Palabras clave:* Monitorización del error, Monitorización vicaria, auto-regulación, aprendizaje observacional.

Learning from oneself and learning from others: neurophysiological correlates of auto- and vicarious performance monitoring

Abstract

Performance monitoring has been studied mainly from a behavioral perspective. Following Rabbitt's pioneering work that describes changes in speed response that follow errors, many studies have contributed to a model of what has been described either as an error detection mechanism, or in a broader sense, a system for performance

monitoring. However, the study of vicarious monitoring (detection of someone else's errors) has not been as thorough as the former one. The existence of an error detection mechanism have received enough empirical data as different research groups started describing neurophysiological correlates of errors during experimental tasks. Through the use of the event related potentials (ERP) technique, several related-components were found: the Error Related Negativity (ERN or Ne), the Error Related Positivity (Pe), the Feedback Related Negativity (FRN) and the Feedback Related P3 (FP3), mainly. Most of these components (obtained from one's own performance) have been found to have an "observational" counterpart (i.e. similar components related to observing someone else's errors). The evaluation of physiologic and neuroanatomical characteristics of both auto-monitoring and vicarious monitoring has substantially contributed to the study of observational learning. The present review focuses on the neurophysiological correlates of auto- and vicarious monitoring in an attempt to systemize data from recent experiments. Although different models have been proposed to account for error monitoring (error detection, conflict detection and rewarding), it is very likely that a more complex system might integrate them and vicarious monitoring studies

might help to construct an integrative view of these phenomena.

Keywords: Error monitoring, vicarious monitoring, self-regulation, observational learning.

Introducción

Al realizar cualquier tarea, ponemos en marcha un conjunto de mecanismos que, a partir de señales internas o del ambiente, nos informan en qué medida lo que estamos haciendo coincide con lo que habíamos planeado. Este sistema permite hacer ajustes cuando los resultados no son adecuados y constituye una importante condición para el aprendizaje. No obstante, dicho sistema puede verse alterado en diversas patologías haciendo que las personas no detecten adecuadamente sus errores en tareas experimentales o en la vida diaria.

Los lóbulos frontales son responsables, en gran parte, de la coordinación de los procesos cognitivos dirigidos a la autorregulación que incluye la verificación de la actividad, la monitorización de errores (ME), la elaboración e implementación de planes de acción y el procesamiento de la retroalimentación (PR); sus conexiones con otras estructuras cerebrales les permiten integrar en una representación, información externa e interna, elementos del pasado y motivaciones (Dubois, Pillon

& Sirigu, 1998). Sin embargo, no ha sido sino hasta las últimas décadas en que un gran número de investigaciones han estado orientadas a dilucidar con precisión cómo funcionan estos mecanismos, de qué estructuras dependen, cómo se desarrollan, cómo pueden alterarse y de qué manera pueden ser objeto de reeducación o rehabilitación. En este sentido, los estudios de pacientes con lesiones cerebrales focales muestran cómo los desórdenes clínicos de la autoconciencia y metacognición pueden estar asociados con la patofisiología prefrontal y llevar a déficits adaptativos en el funcionamiento cotidiano (e.g. Eslinger, 2008).

Regulación Conductual y Detección de Errores

La monitorización del error (ME) forma parte de un conjunto de procesos cognitivos orientados a la autorregulación. La ME puede definirse como el control a nivel superior (ejecutivo) de procesos de nivel inferior y es responsable de la planeación y ejecución del comportamiento (e.g. Banfield, Wyland, Macrae, Münte & Heatherton, 2007). Esta monitorización incluye tanto la evaluación en tiempo real del desempeño durante tareas particulares como la capacidad para identificar los errores cometidos (Ownsworth, Quinn, Fleming, Kendall

& Shum, 2010). Si bien, aún no hay consenso sobre la naturaleza de los mecanismos que subyacen a la monitorización, al menos tres sistemas que pueden ser funcional y anatómicamente dissociables han sido descritos: uno que monitoriza el conflicto entre respuestas (Carter & van Veen, 2007), otro que detecta las acciones erróneas (Ullsperger & von Cramon, 2001), y otro que respondería a la ausencia de reforzamiento en el ambiente (Holroyd & Coles, 2002).

El análisis de los errores que se cometen en una tarea ha sido en los últimos años, un tema recurrente en la neurociencia cognitiva (Taylor, Stern & Gehring, 2007). Además, se han realizado estudios con otras especies que muestran que una parte importante de estas habilidades no son exclusivamente humanas (e.g. Zeman, 2006).

Ejemplo de los primeros estudios de la ME son los experimentos llevados a cabo por Rabbitt y su equipo desde la década de los 60s (ver Rabbitt & Rodgers, 1977 para revisión), a partir de los cuales se dilucidaron tanto el proceso de detección de errores como los orientados a su corrección, como factores que subyacen a la disminución en la velocidad de respuesta cuando se comete un error (e.g. Jentsch & Dudschig, 2009), o la influencia que las pistas sociales pueden tener sobre el desempeño de

una tarea (e.g. Bengtsson, Dolan & Passingham, 2011).

Si bien los resultados de los trabajos mencionados han contribuido a tener modelos más precisos sobre el funcionamiento de la ME, muchos de los errores que se estudian son atribuibles más a una ejecución deficiente que a una planeación defectuosa de la respuesta. La clasificación de Reason (1990; para revisión exhaustiva sobre su vigencia y pertinencia ver Blavier, Rouy, Nyssen de Keyser, (2005)) describe tres tipos de errores: los errores de planeación (*mistakes*) se deben a problemas en esta etapa (la acción se ejecuta de acuerdo al plan y la intención, pero el plan está mal), los errores de retención (*lapses*) resultan de deficiencias en la retención (no se recupera la intención a tiempo o no se recupera en absoluto) y los errores de ejecución (*slips*) que son consecuencias de problemas en la ejecución de la acción (el plan es correcto pero la ejecución no, dado que la acción no corresponde a la intención).

Aspectos conductuales de la comisión de errores

Aunque los correlatos neurofisiológicos de la monitorización del error se han investigado más en las últimas décadas, su estudio en el plano conductual tiene una larga tradición. Como ya hemos mencionado, los estudios clásicos de

Rabbitt (e.g. Rabbitt & Rodgers, 1977) mostraban cómo la velocidad en las respuestas disminuía cuando el participante se daba cuenta de que había cometido un error. Un estudio reciente realizado por Bellebaum, Rustemeier y Daum (2012) mostró que las personas mayores tienden a aprender mejor a partir de retroalimentación positiva en comparación con la retroalimentación negativa, efecto que no se observa en los adultos jóvenes.

A pesar de estos avances, la carencia de medidas objetivas para clarificar los mecanismos neurocognitivos que subyacen el control del comportamiento tanto en sujetos normales como en pacientes neurológicos, continúa siendo un problema a resolver (e.g. Fleming & Ownsworth, 2006; Vuilleumier, 2004).

En cuanto a los instrumentos experimentales, la ME ha sido medida esencialmente a través de paradigmas que pueden ser del tipo Go/No-Go (e.g. Bartholow & Amodio, 2009; Elton, Spaan & Ridderinkhof, 2004; Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000; Vocat, Pourtois & Vuilleumier, 2008) o tipo *Flanker Task* (e.g. Fiehler, Ullsperger & von Cramon, 2005), las cuales habitualmente son modificadas para forzar un incremento en la tasa de errores cometidos (Falkenstein, Hoormann, Christ & Hohnsbein, 2000). Sin embargo, las situaciones experimentales comúnmente

evaluadas en el contexto de un laboratorio, difícilmente resultan indicadores confiables del desempeño en la vida cotidiana, especialmente cuando el objetivo es evaluar la ME en pacientes cerebrolesionados (e.g. Hart, Giovannetti, Montgomery & Schwartz, 1998).

Aspectos neurofisiológicos de la comisión de errores

A partir de la obtención de componentes electrofisiológicos relacionados con la comisión de errores, se han propuesto diversas teorías que en el plano cognitivo intentan explicar de qué manera se da la regulación del desempeño. Tres teorías son las que más poder explicativo tienen hasta el momento y si bien en apariencia son excluyentes, no se puede descartar que en realidad cada una esté explicando una parte pequeña del fenómeno total: (a) el modelo de detección de errores (Gehring, Goss, Coles, Meyer & Donchin, 1993); (b) el modelo de detección del conflicto (Botvinick, Cohen & Carter, 2004); y, (c) el modelo de reforzamiento (Ridderinkhof, Ullsperger, Crone & Nieuwenhuis, 2004). A continuación se detalla cada una.

Modelo de detección de errores

Gehring et al. (1993), tras analizar los componentes eléctricos observados en los errores cometidos en una tarea de estimación temporal, propusieron

como modelo explicativo un sistema cuya función sería la monitorización y compensación del comportamiento erróneo. Tanto en tareas en las que se cometieran errores de elección, errores de acción o de estimación, se observaba un componente negativo al restar los aciertos de los errores, siendo la diferencia máxima alrededor de los 100 milisegundos después de las respuestas. Este componente se conoce como la Negatividad Relacionada con el Error (o *Error Related Negativity*, ERN). El voltaje de este componente estaba relacionado con el énfasis de la tarea: era mayor si se enfatizaba el responder bien y disminuía si lo que se le pedía al sujeto era responder rápido. El tiempo en el que se observa la respuesta eléctrica implicaría que el modelo de respuesta con el que se compara la respuesta real no se basa en información sensorial o propioceptiva, dado que tal información no podría estar disponible sino hasta que la respuesta ha sido iniciada.

La detección de una disparidad entre la respuesta esperada y la emitida podría tener lugar a varios niveles de la respuesta, de acuerdo con el modelo propuesto por Sellen (1994): (a) detección con base en la acción (incongruencia entre el plan de acción y la acción ejecutada, incongruencia entre las intenciones conscientes y las acciones ejecutadas); (b) detección con base en el resultado (incongruencia entre el resultado

esperado y el resultado real, congruencia entre formas esperadas de error y resultado); (c) detección a partir de una limitación funcional externa; (d) detección del error por un agente externo. Cada uno de estos mecanismos de detección funcionaría mejor para un tipo específico de errores, según la taxonomía de Reason (1990), que considera los errores como originados en tres momentos: (a) Formulación de la intención y planeación de la acción; (b) Almacenamiento de la información; y (c) Ejecución de la acción.

Modelo de detección del conflicto

Otra manera de detectar si se ha cometido un error sería a través de la monitorización del conflicto entre respuestas (Carter & van Veen, 2007). Cuando existen dos o más respuestas preponderantes, hay un conflicto continuo que puede resolverse una vez que se ha respondido, esto es, la respuesta correcta podría activarse después de que la respuesta errónea ha sido producida. Un ejemplo clásico estaría dado por la tarea de Stroop, en la que se debe favorecer una respuesta no predominante (e.g. denominar el color de la tinta) por encima de una respuesta preponderante y automática (e.g. la lectura).

Se ha descrito que la región anterior de la corteza cingulada sería sensible al conflicto en las respuestas, es

decir, la coactivación de respuestas mutuamente incompatibles (Yeung, Botvinick & Cohen, 2004) y su función podría ser involucrar a la corteza frontal dorsolateral en la resolución de los conflictos (Carter & van Veen, 2007). Según este modelo, la N2 (componente visible de los PREs) que suele acompañar a los ensayos correctos (y que algunos autores han descrito como negatividad relacionada con respuestas correctas, o CRN) reflejaría el conflicto que se ha producido al responder.

Modelo de reforzamiento

Este modelo sugiere que la corteza cingulada anterior (CCA), cuya activación se refleja en los componentes neurofisiológicos asociados con el error y en los estudios de imagen, forma parte de la red de aprendizaje a partir de reforzamiento (Ridderinkhof et al., 2004). Este sistema, más que detectar si se está cometiendo un error, detectaría si el resultado de la respuesta fue “peor de lo esperado”; es decir, respondería a la ausencia de un reforzamiento externo. Estas estructuras recibirían información del sistema dopamínico mesocortical a través de cambios físicos en la actividad aferente dopaminérgica (Holroyd & Coles, 2002; Holroyd, Larsen & Cohen, 2004), y a partir de esta información se regularía el desempeño en las tareas (Ridderinkhof et al., 2004). En otras palabras, Holroyd y Coles postulan

que cuando se comete un error, el sistema dopamínico a nivel del mesencéfalo lleva una señal negativa de reforzamiento a la corteza frontal, en donde se generaría una negatividad relacionada con el error (o ERN) al desinhibirse las dendritas apicales de las neuronas motrices en la corteza anterior cingulada (CCA). Las señales de error se usarían para entrenar a la CCA, asegurando que el control sobre el sistema motor se daría a las estructuras más aptas para la tarea a la que el sujeto se enfrenta.

Los tres modelos que se han citado no necesariamente son excluyentes. Los autores que inicialmente propusieron cada uno han ido retomando elementos de los otros y es probable que en no mucho tiempo se cuente con una teoría más amplia que explique los datos empíricos disponibles.

Aspectos Neurofisiológicos del Procesamiento de Retroalimentación (PR)

Toda acción que realizamos depende de un complejo sistema en el que participan componentes eferentes (motores) y aferentes (sensoriales). En otras palabras, las acciones que llevamos a cabo involucran sistemas de retroalimentación a distintos niveles. Un ejemplo de esto lo constituye el habla: la ejecución de movimientos precisos y complejos en el aparato fonoarticulador depende de

que se envíen las órdenes adecuadas a los músculos necesarios, pero también que a distintos niveles se envíen señales de regreso al sistema central que informen de qué manera se están ejecutando las órdenes.

El proceso de retroalimentación se puede dar a distintos niveles: desde un nivel superior en el que la formación de programas motores sea regulada antes de su ejecución a partir de un plan de acción, hasta una retroalimentación que se dé en el contexto interpersonal, cuando alguien más nos da información sobre la adecuación de nuestro desempeño.

Se han estudiado distintos sistemas que permiten el PR, entre otras razones porque en diversos padecimientos que afectan al sistema nervioso central pareciera haber un PR deficiente detrás de algunos síntomas que afectan el desempeño. Desde nuestro punto de vista, el procesamiento de errores ajenos constituye una de los pilares esenciales del aprendizaje observacional, el cual puede constituir la base de diversos programas de intervención en pacientes con distintas patologías (ej.: enfermedad vascular cerebral, enfermedad de Parkinson, mielopatías espinales crónicas, deterioro cognitivo inespecífico, encefalopatías de diversa índole, etc.).

Desarrollo de la monitorización del error (ME) y el procesamiento de retroalimentación (PR)

Estos mecanismos dependen de estructuras neuronales cuyo proceso de maduración se extiende por al menos las primeras dos décadas de vida. En particular, los lóbulos frontales han sido descritos como estructuras en las que el proceso de mielinización es especialmente largo. Diversos estudios han abordado este desarrollo tanto en niños (e.g. Santesso, Segalowitz & Schmidt, 2005) como en adolescentes (Zottoli & Grose-Fifer, 2012) y adultos mayores (Bettcher & Giovannetti, 2009).

Otro estudio de Eppinger, Mock & Kray (2009) reportó diferencias en los componentes ERN y FRN al comparar niños con adultos: mientras en los adultos había cambios en función de la validez de la retroalimentación, los niños eran menos sensibles a ella, además de mostrar FRNs de mayor amplitud que las observadas en los adultos, lo cual sugiere una mayor importancia funcional para la retroalimentación en las etapas tempranas del desarrollo. Por su parte, Hämmerer, Li, Müller & Lindenberger (2011) realizaron un estudio abarcando desde niños hasta ancianos y encontraron varios datos: la amplitud de la FRN disminuye con la edad; tanto niños como adultos mayores muestran FRN menos discriminativas entre aciertos y

errores, aprenden mejor de la retroalimentación negativa y necesitan más ensayos para aprender. En conjunto, la literatura sugiere que los mecanismos para el procesamiento de la retroalimentación se establecen antes de la adolescencia y que a partir de allí, las diferencias individuales son más responsables de la variabilidad observada.

Bases anatomofisiológicas

El estudio de la monitorización del desempeño y de las estructuras del sistema nervioso y los procesos fisiológicos subyacentes ha tenido un auge en las últimas décadas gracias en parte, al desarrollo de métodos no invasivos como los estudios de imagen y los psicofisiológicos. Estudios como la resonancia magnética funcional han permitido obtener imágenes con una gran resolución espacial y una buena resolución temporal que han mostrado cuáles son las estructuras del cerebro que se encuentran activas durante estos procesos. Por otra parte, los estudios de PREs, si bien no ofrecen una gran resolución espacial, sí tienen una resolución temporal que ayuda a saber en qué momento se está llevando a cabo el trabajo por distintas estructuras (Bartholow & Amodio, 2009; Dhar, Wiersema & Pourtois, 2011).

Los resultados obtenidos a partir de ambas aproximaciones apuntan a

que la fluidez aparente del control del comportamiento, se logra a través de un trabajo coordinado de distintas áreas corticales, sin que necesariamente haya un controlador central (Garavan, Ross, Murphy, Roche & Stein, 2002). Según estos estudios, las respuestas rápidas dependen de la corteza prefrontal dorsolateral derecha y la corteza cingulada anterior (CCA), el procesamiento de errores y/o conflictos depende de estructuras mediales (como la CCA y la corteza motriz suplementaria) y el mantenimiento de las tareas depende de áreas prefrontales dorsolaterales (Garavan et al.). De manera específica, se ha encontrado que la porción más rostral de la CCA está relacionada con la evaluación rápida de respuestas erróneas (Swick & Turken, 2002), aunque otros autores proponen que más bien se relaciona con una función evaluativa para el ajuste comportamental inmediato cuyo fin sería evitar pérdidas (Magno, Foxe, Molholm, Robertson & Garavan, 2006). En esta línea, los lóbulos frontales serían responsables tanto de la comisión de errores como de su detección a través de la evaluación de los resultados (Blavier et al., 2005), aunque diferentes componentes del proceso cognitivo podrían estar asociados con distintas estructuras.

Como se mencionó con anterioridad, existe una discusión abierta sobre los mecanismos subyacentes a la

regulación del desempeño a través de los errores. Al menos un estudio ha tratado de hacer la distinción, no en términos de cuál proceso explica los hallazgos conductuales y electrofisiológicos, sino en qué medida esos distintos procesos tienen lugar a partir de distintas estructuras cuyo papel funcional hasta el momento no estaba claro (Swick & Turken, 2002). A continuación haremos una breve reseña de algunos estudios en este campo y sus implicaciones teóricas.

Estudios de imagen

Los lóbulos frontales influyen en el funcionamiento del resto de la corteza en buena parte gracias a los circuitos que establecen con estructuras subcorticales como el tálamo y los ganglios basales. Uno de los circuitos que más se ha asociado con el control en el desempeño es el circuito cingulado anterior (e.g. Passingham, Bengtsson & Lau, 2010).

El circuito cingulado anterior se origina en la corteza cingulada anterior ((CCA), área 24 de Brodmann) y proyecta al estriado ventral, de allí a la porción rostromedial del globo pálido, luego al tálamo y finalmente de regreso a la CCA. Del estriado ventral hay proyecciones hacia los globos pálidos y la sustancia negra, cuyas eferencias alcanzan el área tegmental ventral, la habénula, el hipotálamo, la amígdala y el núcleo dorsomedial del tálamo, completando el circuito (Tekin

& Cummins, 2002). La porción caudal de la corteza frontal medial estaría relacionada con las acciones, en tanto la corteza más orbital se asocia a los resultados (Amodio & Frith, 2006).

En un estudio realizado por Garavan et al. (2002), los errores en una tarea go/no-go se asociaban con la activación medial que incluía la CCA, en tanto que las alteraciones comportamentales posteriores al error (Rabbitt & Rodgers, 1977) se asociaban a la CCA y la corteza izquierda prefrontal. Se ha propuesto que con el aprendizaje, la corteza prefrontal medial podría llegar a predecir la posibilidad de cometer errores al reconocer pistas predictivas de tasas altas de errores, pero esta hipótesis no ha encontrado apoyo en estudios recientes (e.g. Nieuwenhuis, Schweizer, Mars, Botvnick & Hajcak, 2007).

El sistema para la detección de errores comparte parcialmente estructuras con regiones del cerebro que están involucradas en la competencia e inhibición de respuestas. En un estudio realizado por Menon, Adleman, White, Glover & Reiss (2001) se encontró que la porción rostral de la CCA, la corteza cingulada posterior y las cortezas insulares anteriores derecha e izquierda, se activaban sólo durante el procesamiento de errores, pero no en la competencia, inhibición, selección o ejecución de respuestas.

Esta actividad a nivel insular podría estar relacionada con las respuestas autonómicas que se asocian con los errores percibidos conscientemente (Ullsperger, Harsay, Wessel & Ridderinkhof, 2010).

Se ha sugerido que el papel de la CCA radica en el señalamiento de la ocurrencia de conflictos en el procesamiento de información, activando ajustes compensatorios en el control cognitivo (Botvinick et al., 2004; Magno et al., 2006). No obstante, es importante considerar que si bien la actividad registrada en este tipo de tareas puede estar vinculada a estas regiones, en realidad éstas forman parte de amplios circuitos (como el de Papez) y es muy probable que los cambios que en ellas se observan sean consecuencia de procesamiento más amplio que incluye a otras estructuras (Luu, Tucker, Derryberry, Reed & Poulsen, 2003).

El efecto de la retroalimentación después de cometer errores fue analizado por Ullsperger y von Cramon (2003), quienes en un estudio en el que utilizaron resonancia magnética funcional, encontraron que la retroalimentación positiva activaba el estriado ventral (núcleo accumbens) en tanto la negativa hacía lo propio con el área motriz cingulada rostral, la ínsula anteroinferior y el epítalamo.

En lo que respecta a la distinción entre estructuras relacionadas con los errores propios y los ajenos, Shane, Stevens, Harenski & Kiehl (2008) identificaron en un estudio reciente áreas relacionadas con la observación de los errores cometidos por otros: en particular la porción rostral/ventral de la CCA y la Corteza Parietal Inferior (CPI); aparentemente, la CPI serviría para distinguir las acciones propias de las ajenas, y la CCA permitiría una comprensión mediada por el contexto de los errores cometidos por los otros. En este sentido, otros estudios han mostrado activaciones similares ante los errores propios y ajenos, sugiriendo que se utilizarían los mismos mecanismos para evaluar el desempeño propio y el ajeno (Shane et al., 2008; Yu & Zhou, 2006).

Uddin, Iacoboni, Lange y Keenan (2007) han propuesto que las áreas de neuronas espejo frontoparietales constituyen la base para la conjunción de información propia y ajena a través de mecanismos de estimulación motriz, en tanto que las estructuras de la línea media procesan información acerca de sí mismo y de los otros de una manera más abstracta y evaluativa. La corteza medial prefrontal aparentemente media los procesos metacognitivos que pueden ser usados para autoevaluaciones directas y reflejadas en función de las demandas de una tarea específica (Ochsner et al., 2005).

Potenciales relacionados con eventos (PREs)

Psicológicamente, los Potenciales relacionados con eventos (PREs) representan manifestaciones neuronales de actividades específicas de procesamiento de información asociadas con un estímulo o una respuesta (Bartholow & Amodio, 2009; Gehring et al., 1993). El análisis de los PREs que acompañan a los errores aporta evidencia sobre un proceso neural cuya actividad está específicamente asociada con la monitorización y la compensación del comportamiento erróneo (Gehring et al.). Se han estudiado cuatro componentes como vinculados a la monitorización de errores: la Negatividad relacionada con el error (ERN o Ne), la Positividad relacionada con el error (Pe) y dos componentes vinculados con la retroalimentación: la Negatividad Relacionada con la Retroalimentación o Feedback Related Negativity (FRN) y el P300 asociado con la retroalimentación (fP300). Si bien, en la práctica estos componentes pueden ser tratados como reflejo del procesamiento del error, no hay consenso entre los investigadores sobre si realmente hay un proceso común subyacente o en realidad tanto los procesos cognitivos como la base anatomofisiológica de éstos son distintos; hasta ahora, los instrumentos de los que disponemos no han dejado claras esas diferencias (Simons, 2010). Según algunos

autores, el poder explicativo de componentes como la Pe ha sido subestimado, ya que este componente podría reflejar de manera más pura que los otros la detección de error, sin sus consecuencias o aspectos motivacionales (Steinhauser & Yeung, 2011).

Alteraciones en la monitorización del error y el procesamiento de la retroalimentación

Tanto la autorregulación en general como la ME en particular se relacionan con estructuras cerebrales específicas, por lo que las lesiones que involucran a estos sistemas suelen disminuir las capacidades de la persona para detectar los errores en su propio desempeño. Las alteraciones pueden ocurrir tanto en el desarrollo, como es el caso del trastorno por déficit de atención (e.g. Wiersma, van der Meere & Roeyers, 2009), autismo (Sokhadze et al., 2010), el síndrome de Tourette (Eichele et al., 2010), en las enfermedades psiquiátricas (e.g. Brazil et al., 2011; Menon et al., 2001), en las lesiones cerebrales (e.g. Vuilleumier, 2004), en los trastornos degenerativos (e.g. Falkenstein et al., 2001), o incluso en abuso de sustancias (e.g. Sokhadze, Stewart, Hollifield & Tasman, 2008) y en adultos disléxicos (e.g. Horowitz-Kraus & Breznitz, 2009).

Las alteraciones metacognitivas debidas a lesiones frontales pueden incluir una sobreestimación de las capacidades propias, falta de conciencia de los déficits adquiridos, incapacidad para aprender de la experiencia y pobre utilización de la retroalimentación para modificar las estrategias de resolución de problemas (Eslinger, 2008).

A partir de una mejor comprensión de los mecanismos que subyacen a la monitorización de los errores en el desempeño, se podrían diseñar mejores programas de intervención para personas de las poblaciones que se han descrito (e.g. Ownsworth, McFarland & McYoung, 2000). Se cuenta ya sobre todo con estudios de caso y algunos estudios de grupo en los que se ha demostrado que intervenciones orientadas a la mejora en la metacognición tienen un efecto favorable en la ME y el desempeño en general de personas con lesiones cerebrales. Carter y van Veen (2007) han sugerido que algunas alteraciones de la cognición y el comportamiento, como la esquizofrenia y el trastorno obsesivo compulsivo, podrían ser comprendidas como el resultado de funciones de monitorización del desempeño alteradas.

Procesamiento vicario y no contingente del error

En las últimas dos décadas se han realizado numerosos estudios en los

que la monitorización del error ha sido abordada a partir de errores ajenos. El aprendizaje observacional tiene en parte como base la detección de los errores cometidos por otros y la observación de las estrategias que se ponen en marcha para su corrección. En el plano conductual, un estudio de Nuñez Castellar, Notabaert, van den Bossche y Fias (2011) mostró que los tiempos de reacción en una tarea tipo Flanker se modifican cuando los participantes responden a la tarea y observan a otros respondiendo (que pueden ser una computadora o un participante real), en función de la manera en que observadores y observados interactúan (cooperación o competencia). Ver a alguien que ejecuta una tarea no sólo modifica el funcionamiento del sistema de detección de errores en quien observa, sino que también tiene efectos sobre aquel que es observado: en un estudio que utilizó resonancia magnética (Radke, de Lange, Ullsperger & de Bruijn, 2011) se encontró que cuando un participante cometía errores que sólo afectaban a sí mismo, la activación predominante se daba a nivel de la corteza frontal medial posterior, en tanto que si los errores afectaban a los otros, se producía una activación específica de la corteza prefrontal medial.

Por otra parte, otros estudios también han intentado obtener los componentes neurofisiológicos

asociados con el procesamiento del error de manera no contingente, es decir, no vinculados de manera inmediata al desempeño. En este sentido, la FRN ha sido ya estudiada con retroalimentación no vinculada a una respuesta. Donkers, Nieuwenhuis y van Boxtel (2005) realizaron un experimento de apuestas en el que obtuvieron una negatividad mediofrontal similar a la FRN, con voltajes más negativos para las pérdidas que para las ganancias, donde la amplitud de esta forma de onda similar a FRN correlacionó positivamente con la amplitud de una FRN típica, obtenida ante las retroalimentaciones negativas en una tarea de estimación temporal.

Diversos experimentos en los que se evalúa la detección observacional de errores han considerado como variable la cercanía entre los participantes. En algunos casos se contrasta a los participantes conocidos con los extraños, e incluso en otros se compara a participantes “reales” con el desempeño de una computadora. En un estudio reciente realizado por Wu, Leliveld y Zhou (2011), los participantes recibían propuestas en el “juego del dictador” que podían ser justas o injustas, y eran atribuidas a personas socialmente cercanas o distantes; se encontró que una negatividad mediofrontal (NMF) se asociaba con una violación de las expectativas (ofertas injustas hechas por alguien socialmente cercano, pero no las

hechas por un extraño), en tanto que un P300 mostraba mayor amplitud cuando las ofertas eran justas, independientemente de a quién eran atribuidas.

Conclusiones

En resumen, el reconocimiento de la existencia de un mecanismo dedicado a la detección de errores y sus consiguientes bases neurales ha permitido la elaboración de un conjunto de teorías acerca de cómo y dónde se detectan y procesan los errores, permitiendo diferenciar la monitorización del desempeño propio de la monitorización vicaria. A pesar de los distintos modelos explicativos actuales sobre el error, lo más sensato es que lleguemos a postular la existencia de un sistema más complejo pero integrador, donde cada uno de los aspectos involucrados en la emisión, detección y corrección del error sean abarcados, y es en este sentido en el que los estudios sobre la monitorización vicaria desempeñan un papel más importante. Por último, la búsqueda incesante de los sustratos neurales que subyacen a este sistema, comprende tanto la identificación de los mismos como el orden temporal en el que se involucran. A responder la primera de estas interrogantes contribuyen de manera prioritaria los estudios de imagen con alta resolución espacial (ej. resonancia magnética funcional), mientras que herramientas como los

PREs parecen brindar un sustantivo aporte a la comprensión de la segunda.

Referencias

Amodio, D. M., & Frith, C. D. (2006). Meeting of minds: The medial frontal cortex and social cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, *7*, 268-277.

Banfield, J. F., Wyland, C. L., Macrae, C. N., Münte, T. F., & Heatherton, T. F. (2007). The cognitive neuroscience of self-regulation. En: R. F. Baumeister & K. D. Vohs (Eds.). *Handbook of self-regulation. Research, theory, and applications* (pp. 62-83). Nueva York, NY: Guilford.

Bartholow, B. D., & Amodio, D. M. (2009). Using event-related brain potentials in social psychological research. A brief review and tutorial. En E. Harmon-Jones & J. S. Beer (Eds.). *Methods in social neuroscience* (pp.198-232). Nueva York, NY: Guilford.

Bellebaum, C., Rustemeier, M., & Daum, I. (2012). Positivity effect in healthy aging in observational but not active feedback-learning. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, *19*, 402-420.
doi:10.1080/13825585.2011.629289

Bengtsson, S. L., Dolan, R. J., & Passingham, R. E. (2011). Priming for

self-esteem influences the monitoring of one's own performance. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *6*, 417-425. doi:10.1093/scan/nsq048

Bettcher, B. M., & Giovannetti, T. (2009). From cognitive neuroscience to geriatric neuropsychology: What do current conceptualizations of the action error handling process mean for older adults? *Neuropsychology review*, *19*, 64-84. doi: 10.1007/s11065-009-9081-6

Blavier, A., Rouy, E., Nyssen, A. S., & De Keyser, V. (2005). Prospective issues for error detection. *Ergonomics*, *48*, 758-781. doi:10.1080/00140130500123670

Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*, 539-546. doi: 10.1016/j.tics.2004.10.003

Brazil, I. A., Mars, R. B., Bulten, B. H., Buitelaar, J. K., Verkes, R. J., & De Bruijn, E. R. A. (2011). A neurophysiological dissociation between monitoring one's own and others' actions in psychopathy. *Biological Psychiatry*, *69*, 693-699.

Carter, C. S., & van Veen, V. (2007). Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *7*, 367-379. doi: 10.3758/CABN.7.4.367

Dhar, M., Wiersema, J. R., & Pourtois, G. (2011). Cascade of neural events leading from error commission to subsequent awareness revealed using EEG source imaging. *PLoS One*, 6, e19578. doi: 10.1371/journal.pone.0019578

Donkers, F. C., Nieuwenhuis, S., & van Boxtel, G. J. (2005). Mediofrontal negativities in the absence of responding. *Cognitive Brain Research*, 25, 777-787. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2005.09.007

Dubois, B., Pillon, B., & Sirigu, A. (1998). Fonctions intégratrices et cortex préfrontal chez l'homme. En X. Seron & M. Jannerod (Eds.). *Neuropsychologie humaine* (2a ed.) pp. 453-470. Lieja: Mardaga.

Eichele, H., Eichele, T., Hammar, A., Freyberger, H. J., Hugdahl, K., & Plessen, K. J. (2010). Go/NoGo performance in boys with Tourette syndrome. *Child Neuropsychology*, 16, 162-168.

Elton, M., Spaan, M., & Ridderinkhof, K. R. (2004). Why do we produce errors of commission? An ERP study of stimulus deviance detection and error monitoring in a choice go/no-go task. *European Journal of Neuroscience*, 20, 1960-1968. doi: 10.1111/j.1460-9568.2004.03631.x

Eppinger, B., Mock, B., & Kray, J. (2009). Developmental differences in learning and error processing:

evidence from ERPs. *Psychophysiology*, 46, 1043-1053. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00838.x

Eslinger, P. J. (2008). The frontal lobe: executive, emotional and neurological functions. En P. Mariën & J. Abutalebi (Eds.). *Neuropsychological research. A review*. (pp. 379-408). Nueva York, NY: Psychology Press.

Falkenstein, M., Hielscher, H., Dziobek, I., Schwarzenau, P., Hoormann, J., Sundermann, B., & Hohnsbein J. (2001). Action monitoring, error detection, and the basal ganglia: an ERP study. *Neuroreport*, 12, 157-161.

Falkenstein, M., Hoormann, J., Christ, S., & Hohnsbein, J. (2000). ERP components on reaction errors and their functional significance: a tutorial. *Biological Psychology*, 51, 87-107. doi:10.1016/S0301-0511(99)00031-9

Fiehler, K., Ullsperger, M. & von Cramon, D. Y. (2005). Electrophysiological correlates of error correction. *Psychophysiology*, 42, 72-82. doi:10.1111/j.1469-8986.2005.00265.x

Fleming, J. M., & Ownsworth, T. (2006). A review of awareness interventions in brain injury rehabilitation. *Neuropsychological Rehabilitation*, 16, 474-500. doi:10.1080/09602010500505518

- Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roche, R. A. P., & Stein, E. A. (2002). Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: Inhibition, error detection, and correction. *Neuroimage*, *17*, 1820-1829. doi:10.1006/nimg.2002.1326
- Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, *4*, 385-390.
- Hämmerer, D., Li, S. C., Müller, V., & Lindenberger, U. (2011). Life span differences in electrophysiological correlates of monitoring gains and losses during probabilistic reinforcement learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 579-592.
- Hart, T., Giovannetti, T., Montgomery, M. W., & Schwartz, M. F. (1998). Awareness of errors in naturalistic action after traumatic brain injury. *Journal of Head Trauma Rehabilitation*, *13*, 16-28.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, *109*, 679-709. doi:10.1037/0033-295X.109.4.679
- Holroyd, C. B., Larsen, J. T., & Cohen, J. D. (2004). Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psychophysiology*, *41*, 245-253. doi:10.1111/j.1469-8986.2004.00152.x
- Horowitz-Kraus, T., & Breznitz, Z. (2009). Can the error detection mechanism benefit from training the working memory? A comparison between dyslexics and controls- An ERP study. *Plos ONE*, *4*, e7141.
- Jentsch, I., & Dudschig, C. (2009). Why do we slow down after an error? Mechanisms underlying the effects of posterror slowing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *62*, 209-218. doi:10.1080/17470210802240655
- Kiehl, K. A., Liddle, P. F., & Hopfinger, J. B. (2000). Error processing and the rostral anterior cingulate: An event-related fMRI study. *Psychophysiology*, *37*, 216-223. doi:10.1111/1469-8986.3720216
- Luu, P., Tucker, D. M., Derryberry, D., Reed, M., & Poulsen, C. (2003). Electrophysiological responses to errors and feedback in the process of action regulation. *Psychological Science*, *14*, 47-53. doi:10.1111/1467-9280.01417
- Magno, E., Foxe, J. J., Molholm, S., Robertson, I. H., & Garavan, H. (2006). The anterior cingulate and error avoidance. *The Journal of neuroscience*, *26*, 4769-4773. doi:10.1523/JNEUROSCI.0369-06.2006

Menon, V., Adleman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human brain mapping, 12*, 131-143.

Nieuwenhuis, S., Schweizer, T. S., Mars, R. B., Botvinick, M. M., & Hajcak, G. (2007). Error-likelihood prediction in the medial frontal cortex: A critical evaluation. *Cerebral Cortex, 17*, 1570-1581. doi:10.1093/cercor/bhl068

Núñez Castellar, E., Notebaert, W., van den Bossche, L., & Fias, W. (2011). How monitoring other's actions influences one's own performance. Post-error adjustments are influenced by the nature of the social interaction. *Experimental psychology, 58*, 499-508. doi: 10.1027/1618-3169/a000118

Ochsner, K. N., Beer, J. S., Robertson, E. R., Cooper, J. C., Gabrieli, J. D., Kihlstrom, J. F., & D'Esposito, M. (2005). The neural correlates of direct and reflected self-knowledge. *Neuroimage, 28*, 797-814. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.06.069

Ownsworth, T. L., McFarland, K., & McYoung, R. (2000). Self-awareness and psychosocial functioning following acquired brain injury: An evaluation of a group support programme. *Neuropsychological*

Rehabilitation, 10, 465-484. doi:10.1080/09602010050143559

Ownsworth, T. L., Quinn, H., Fleming, J., Kendall, M., & Shum, D. (2010). Error self-regulation following traumatic brain injury: A single case study evaluation of metacognitive skills training and behavioural practice interventions. *Neuropsychological Rehabilitation, 20*, 59-80. doi: 10.1080/09602010902949223

Passingham, R. E., Bengtsson, S. L., & Lau, H. C. (2010). Medial frontal cortex: From self-generated action to reflection on one's own performance. *Trends in cognitive sciences, 14*, 16-21. doi: 10.1016/j.tics.2009.11.001

Rabbitt, P. M. A., & Rodgers, B. (1977). What does a man do after he makes an error? An analysis of response programming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology, 29*, 727-743. doi:10.1080/14640747708400645

Radke, S., De Lange, F. P., Ullsperger, M., & De Bruijn, E. R. A. (2011). Mistakes that affect others: An fMRI study on processing of own errors in a social context. *Experimental brain research, 211*, 405-413.

Reason, J., (1990). *Human error*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.

- Ridderinkhof, K. R., Ullsperger, M., Crone, E. A., & Nieuwenhuis, S. (2004). The role of the medial frontal cortex in cognitive control. *Science*, *306*, 443-447.
- Santesso, D. L., Segalowitz, S. J., & Schmidt, L. A. (2005). ERP correlates of error monitoring in 10-year olds are related to socialization. *Biological Psychology*, *70*(2), 79-87. doi:10.1016/j.biopsycho.2004.12.004
- Sellen, A. J. (1994). Detection of everyday errors. *Applied Psychology*, *43*, 475-98. doi:10.1111/j.1464-0597.1994.tb00841.x
- Shane, M. S., Stevens, M., Harenski, C. L., & Kiehl, K. A. (2008). Neural correlates of the processing of another's mistakes: a possible underpinning for social and observational learning. *Neuroimage*, *42*, 450-459. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.12.067
- Simons, R. F. (2010). The way of our errors: Theme and variations. *Psychophysiology*, *47*, 1-14. doi:10.1111/j.1469-8986.2009.00929.x
- Sokhadze, E., Baruth, J., El-Baz, A., Horrell, T., Sokhadze, G., Carroll, T., & Casanova, M. F. (2010). Impaired error monitoring and correction function in autism. *Journal of Neurotherapy*, *14*, 79-95. doi:10.1080/10874201003771561
- Sokhadze, E., Stewart, C., Hollifield, M., & Tasman, A. (2008). Event-related potential study of executive dysfunctions in a speeded reaction task in cocaine addiction. *Journal of Neurotherapy*, *12*, 185-204.
- Steinhauser, M., & Yeung, N. (2010). Decision processes in human performance monitoring. *The Journal of neuroscience*, *30*, 15643-15653. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1899-10.2010
- Swick, D., & Turken, U. (2002). Dissociation between conflict detection and error monitoring in the human anterior cingulate cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *99*, 16354-16359. doi:10.1073/pnas.252521499
- Taylor, S. F., Stern, E. R., & Gehring, W. J. (2007). Neural systems for error monitoring: Recent findings and theoretical perspectives. *Neuroscientist*, *13*, 160-172. doi:10.1177/1073858406298184
- Tekin, S., & Cummings, J. L. (2002). Frontal-subcortical neuronal circuits and clinical neuropsychiatry: An update. *Journal of psychosomatic research*, *53*, 647-654.
- Uddin, L. Q., Iacoboni, M., Lange, C., & Keenan, J. P. (2007). The self and social cognition: The role of cortical midline structures and mirror neurons. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*,

153-157.

doi:10.1016/j.tics.2007.01.001

Ullsperger, M., Harsay, H. A., Wessel, J. R., & Ridderinkhof, K. R. (2010). Conscious perception of errors and its relation to the anterior insula. *Brain Structure and Function*, *214*, 629-643.

Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2001). Subprocesses of performance monitoring: A dissociation of error processing and response competition revealed by event related fMRI and ERPs. *Neuroimage*, *14*, 1387-1401. doi: 10.1006/nimg.2001.0935

Ullsperger, M., & von Cramon, D. Y. (2003). Error monitoring using external feedback: Specific roles of the habenular complex, the reward system, and the cingulate motor area revealed by functional magnetic resonance imaging. *The Journal of Neuroscience*, *23*, 4308-4314.

Vocat, R., Pourtois, G. & Vuilleumier, P. (2008). Unavoidable errors: A spatio-temporal analysis of time-course and neural sources of evoked potentials associated with error processing in a speeded task. *Neuropsychologia*, *46*, 2545-2555. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2008.04.006

Vuilleumier, P. (2004). Anosognosia: The neurology of beliefs and *Psychophysiology*, *49*, 413-420. doi:10.1111/j.14698986.2011.01312.x

uncertainties. *Cortex*, *40*, 9-17. doi:10.1016/S0010-9452(08)70918-3

Wiersema, J. R., van der Meere, J. J., & Roeyers, H. (2005). ERP correlates of impaired error monitoring in children with ADHD. *Journal of Neural Transmission*, *112*, 1417-1430.

Wu, Y., Leliveld, M. C., & Zhou, X. (2011). Social distance modulates recipient's fairness consideration in the dictator game: an ERP study. *Biological Psychology*, *88*, 253-62. doi:10.1016/j.biopsycho.2011.08.009

Yeung, N., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological review*, *111*, 931-959. doi:10.1037/0033-295X.111.4.931

Yu, R., & Zhou, X. (2006). Brain potentials associated with outcome expectation and outcome evaluation. *Neuroreport*, *17*, 1649-1653. doi:10.1097/01.wnr.0000236866.39328.1d

Zeman, A. (2006). What do we mean by "conscious" and "aware"? *Neuropsychological Rehabilitation*, *16*, 356-376. doi:10.1080/09602010500484581

Zottoli, T. M., & Grose-Fifer, J. (2012). The feedback-related negativity (FRN) in adolescents.