



Universidad de Chile  
Facultad de Filosofía y Humanidades  
Centro de Estudios Cognitivos

EL VALOR ESPERADO Y EL VALOR DE GANAR: PROBABILIDAD Y TAMAÑO DE  
RECOMPENSAS MONETARIAS AFECTAN POTENCIALES CEREBRALES  
RELACIONADOS A RESULTADOS.

Tesis para optar al Grado de  
Magíster en Estudios Cognitivos

Por:  
René San Martín.

Director de Tesis:  
Ricardo García.

Co-Director Externo:  
Agustín Ibañez.

Santiago, Octubre 2009

*...the global function of the nervous system can be characterized as decision making as regard to evolutionary fitness.*

Paul Glimcher  
(2003, *Decisions, Uncertainty and the Brain*, pp. 174).

*It is perfectly rational to play a risky game: what is irrational is to deceive oneself about the risk.*

Imre Lakatos.  
(1971, *History of science and its rational reconstruction*, pp. 104)

# 1. TABLA DE CONTENIDOS

<b>2. Resumen</b>	<b>6</b>
<b>2. Abstract</b>	<b>7</b>
<hr/>	
<b>3. Introducción al Problema de Investigación</b>	<b>8</b>
<hr/>	
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>15</b>
<hr/>	
4.1. El <i>Error–Related Negativity</i>	15
4.2. El Sistema Mesencefálico Dopaminérgico	19
4.3. El Córtex Cingulado Anterior	24
4.4. Aprendizaje en el Córtex Cingulado Anterior	26
4.5. El mecanismo de generación del <i>Error–Related Negativity</i>	29
<b>5. Marco Metodológico</b>	<b>33</b>
<hr/>	
5.1. Objetivos de la Investigación	33
5.1.1. <i>Objetivo general</i>	33
5.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	33
5.2. Preguntas de investigación	34
5.3. Hipótesis de trabajo	35
5.4. Materiales y Métodos	36

5.4.1. Participantes	36
5.4.2. Diseño de paradigma	36
5.4.3. Procedimiento experimental	38
5.4.4. Registro electrofisiológico	41
5.4.5. Procedimiento de Análisis de Datos	42
<b>6. Resultados</b>	<b>45</b>
<hr/>	
6.1. Resultados comportamentales	45
6.1.1. Tarea experimental	45
6.1.1a. Conducta de elección	45
6.1.1b. Tiempos de reacción	48
6.1.2. Reportes de satisfacción (tarea posterior al experimento)	49
6.2. Potenciales relacionados a eventos	50
6.2.1. P200	51
6.2.2. Feedback Error-Related Negativity (fERN)	53
6.2.3. Positividad de Error (Pe)	60
<b>7. Contrastación de Hipótesis</b>	<b>65</b>
<hr/>	
<b>8. Discusión y Conclusiones</b>	<b>66</b>
<hr/>	

## 7. Referencias

81

---

ANEXO 1: *Resultados Complementarios*

99

ANEXO 2: *Código fuente “Minigarito”.*

104

ANEXO 3: *Carta de Consentimiento Participantes.*

117

## 2. RESUMEN

El feedback error-related negativity (fERN) ha sido referido como una deflexión negativa en el potencial relacionado a eventos (ERP), que distingue entre ganancias y pérdidas, en tanto resultados esperados y no esperados respectivamente. Algunos estudios hablan de *resultado esperado* como la *probabilidad* de ganar vs. perder, y otros como el *tamaño esperado* de las recompensas. Aun no se sabe mucho respecto de si estas interpretaciones alternativas de *resultado esperado* afectan diferencialmente el fERN, ni el efecto de su interacción en términos de un *valor esperado*. Para abordar estas preguntas, se diseñó una tarea con cuatro categorías de juego de azar; dos presentando el mismo valor esperado, y las otras dos siendo equivalente a las primeras, alternativamente, en la *probabilidad* o en el *tamaño* de las ganancias ofrecidas.

Los resultados muestran al fERN precedido por un P200, posiblemente modulado por facilitación atencional, y seguido por una onda tipo Positividad de Error (tipo-Pe) que diferencia entre perder en la categoría con el mayor *valor esperado* y el resto de las condiciones experimentales. El fERN por su parte, diferencia entre ganar y perder, pero los cambios en el *tamaño* y *probabilidad* de recompensas impacta la amplitud de dicho componente sólo en las *condiciones de ganancia*, mostrando que a mayor *valor esperado*, mayor positividad siguiendo a los feedbacks de ganancia. Estos resultados apoyan la idea de que la *probabilidad* y el *tamaño* de las recompensas ofrecidas modulan el valor motivacional de los feedbacks de ganancia, siendo también esto cierto para su interacción en un *valor esperado*.

## 2. ABSTRACT

Feedback error-related negativity (fERN) has been referred to as a negative deflection in the event related potential (ERP), which distinguishes between wins and losses in terms of expected and unexpected outcomes. Some studies refer to the “expected outcome” as the probability to win vs. to lose, and others as expected size of rewards. We still do not know much about whether these alternative interpretations of “expected outcome” affect the fERN in a different manner, nor do we know the effect of their interaction in an expected value fashion. We set a gambling task with four game categories; two had the same expected value, while the other two categories were equivalent to the first ones, but alternatively in the size or probability of the offered rewards. Results show fERN preceded by a P200, and followed by a Pe-like wave differentiates between losing in the category with a higher expected value and the rest of the experimental conditions. fERN differentiates between wins and losses, but changes in the size and probability of rewards impact the fERN amplitude only in win conditions. Results also show greater positivity following win feedback when the size and/or probability of the outcome rewards were higher, so that the higher the expected value the greater the positivity following win feedback. Our findings support the notion that both the probability and size of the offered rewards modulate the motivational value for the win feedback, this being also true for their interaction in an expected value fashion.

### 3. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Una capacidad básica implicada en lo que llamamos “inteligencia”, tienen que ver con la posibilidad de evaluar el resultado de nuestras acciones, y usar esa evaluación para optimizar nuestras conductas orientadas a metas. Recientemente el campo de la neuroeconomía (revisada en Clithero, J.A., Tankersley, D. & Huettel, S.A., 2008; Schultz, W., 2008) se ha interesado en estas materias, mostrando que estos procesos son menos obvios de lo que podría parecer. Por ejemplo, perder en un juego de lotería es un mal resultado, pero ¿su grado de “maldad” es definido sólo por el costo del boleto?, ¿se verá afectado por el *tamaño* del premio no ganado?, ¿afectará cuán probable parecía ganar?. Por el otro lado, ganar una mano de póker es un buen resultado, pero ¿cuál es su grado de “bondad”?, ¿es éste definido sólo por el monto de dinero ganado?, ¿tendrá que ver también con haber evitado el escenario de perder cuándo se tenía una buena mano?. La neurociencia cognitiva de la toma de decisiones viene dando luces en términos de que la evaluación de resultados en contextos económicos podría estar reflejando la acción de un mecanismo general de monitoreo conductual. Estos hallazgos están ayudando a resolver preguntas de larga data respecto de expectativas y evaluación de resultados.

Un importante descubrimiento en el camino hacia el desciframiento de los mecanismos neurocognitivos que sostienen el monitoreo del comportamiento en humanos, se refiere a la existencia de un componente del potencial relacionado a eventos (ERP, por *event-related potential*) que diferencia entre éxitos y errores en tareas de tiempo de reacción, el denominado *error-related negativity* (ERN; Falkenstein, Hohnsbein, Hoormann & Blanke, 1990; Gehring, Goss, Coles, Meyer & Donchin, 1993). Estudios sucesivos mostraron que el ERN puede también ser elicitado por feedbacks entregados a los sujetos sobre los resultados de su desempeño (Holroyd & Krigolson, 2007; Mars, De



Bruijn, Hulstijn, Miltner & Coles, 2004; Miltner, Braun & Coles, 1997; revisado en Holroyd, Nieuwenhuis, Mars & Coles, 2004; Nieuwenhuis, Holroyd, Mol & Coles, 2004). El ERP resultante distingue entre feedbacks positivos y negativos, mostrando una negatividad más pronunciada para los negativos que alcanza su máximo alrededor de los 250 ms. luego de la aparición del feedback (Holroyd & Coles, 2002). A partir de la evidencia en favor de este segundo tipo de ERN, la literatura generalmente distingue entre un ERN de respuesta (*response-locked ERN*), la primera versión y un ERN de feedback (fERN, por *feedback-locked ERN*).

De acuerdo a la teoría más aceptada, el ERN, en sus dos versiones, refleja la acción de sistema genérico y de alto nivel para el procesamiento del error en humanos (Holroyd & Coles, 2002). Un importante cuerpo de evidencia (Holroyd, Coles & Nieuwenhuis, 2002; Holroyd, Nieuwenhuis, Yeung & Cohen, 2003; Holroyd, Yeung, Coles & Cohen, 2005), sugiere que el ERN indica cuando los resultados son peores que los esperados. El descenso de los niveles de dopamina en el cerebro, fruto de un descenso en la actividad fásica de las neuronas dopaminérgicas del mesencéfalo, llegaría al córtex cingulado anterior (ACC, por *Anterior Cingulated Cortex*), como señal para su entrenamiento apuntado a la optimización comportamental en la tarea en curso. Tanto el descenso en la actividad fásica de las neuronas dopaminérgicas a modo de señal de error de predicción (*reward prediction error signal*) (Bayer & Glimcher, 2005; Fiorillo, Tobler & Schultz, 2003; Schultz, Dayan & Montague, 1997; Schultz, 2002) como el rol del ACC en el monitoreo del conflicto y control cognitivo, en primates no humanos (Procyk, Tanaka & Joseph, 2000; Shima & Tanji, 1998) y en humanos (Botvinick, Braver, Barch, Carter & Cohen, 2001; Elliott & Dolan, 1998; Knutson, Westdorp, Kaiser & Hommer, 2000; revisado en Botvinick, Cohen & Carter, 2004) se hayan ampliamente apoyados por evidencia empírica. La teoría continúa, señalando que la señal dopaminérgica también desinhibiría las dendritas

apicales de neuronas motoras en el córtex frontal, generando el ERN (Holroyd & Coles, 2002). Investigaciones posteriores complementan estos postulados iniciales, mostrando que las consecuencias serían evaluadas en términos relativos a otros posibles resultados, y no en términos absolutos (Holroyd, Larsen & Cohen, 2004).

Según el planteamiento esbozado, conocido como la *reinforcement learning theory* del ERN, un factor clave para entender la modulación de la amplitud del ERN, es la diferencia entre los resultados esperados y los resultados efectivos de las acciones. Es decir, la diferencia entre las expectativas de los sujetos y el resultado de sus conductas. Para el caso del fERN, esta diferencia definiría el significado motivacional del feedback recibido (Nieuwenhuis, Holroyd *et al.*, 2004; Potts, Martin, Burton, Montague, 2006; Yeung, Holroyd, & Cohen, 2005). Ahora, mientras algunas investigaciones que usan juegos económicos se refieren a “*resultado esperado*” en términos de “*tamaño* esperado de las ganancias y/o pérdidas” (Gehring & Willoughby, 2002; Holroyd, Larsen *et al.*, 2004; Holroyd, Hajcak & Larsen, 2006; Nieuwenhuis, Yeung, Holroyd, Schurger & Cohen, 2004), otros estudios se refieren a la *probabilidad* de ganar vs. perder (Cohen, Elger & Ranganath, 2007; Hajcak, Holroyd, Moser & Simons, 2005; Hewig, Trippe, Hecht, Coles, Holroyd & Miltner, 2007; Holroyd, Krigolson, Baker, Lee & Gibson, 2009; Potts *et al.*, 2006). De momento no se sabe si estas dos interpretaciones de “*resultado esperado*” afectan al fERN de modos diferentes. Parece útil revisar algunos ejemplos de ambas alternativas. Respecto de la primera, Gehring & Willoughby (2002) presentan una secuencia de juego dónde los participantes deben elegir entre dos cuadros, uno mostrando el número 5 y el otro el 25 (en referencia a centavos estadounidenses). Un segundo tras la elección, cada cuadro se vuelve o rojo, o verde. Si el cuadro elegido se vuelve verde, el participante gana un monto equivalente al representado por el número en el cuadro. Si en cambio el cuadro se vuelve rojo, el monto significa una pérdida, por lo

tanto se sustrae la cantidad respectiva de las ganancias acumuladas. Los resultados no sólo mostraron una mayor amplitud del fERN para feedbacks de pérdida en comparación con los de ganancia, también para pérdidas de gran *tamaño* (-25¢), comparadas con aquellas más pequeñas (-5¢). Gehring & Willoughby (2002) se refirieron a este componente como *medial-frontal negativity* (MFN), sin embargo Nieuwenhuis, Yeung *et al.* (2004) demostraron la equivalencia entre MFN y fERN. En otro estudio, Holroyd, Larsen *et al.* (2004) hallaron un fERN evidenciando una evaluación del *tamaño* de las pérdidas en términos relativos, y no de su valor absoluto. De este modo, por ejemplo, ganar nada (0¢) cuando los otros posibles resultados eran ganar 2.5¢ o 5¢, generó mayores negatividades que ganar nada (0¢), cuando los otros resultados posibles eran perder 2.5¢ o 5¢. Los autores de estos estudios explicitan que sus diseños asignan probabilidades equivalentes a los distintos resultados, de modo que las diferencias observadas sólo puedan explicarse por diferencias la *valencia* (ganar vs. perder) y el *tamaño* de de los resultados.

Un estudio más reciente se enfocó en el efecto de la *probabilidad* de los resultados. Hewig *et al.* (2007) condujeron un detallado análisis electrofisiológico de la toma de decisiones en una tarea de juego correspondiente a la versión alemana del Blackjack. La meta del juego es obtener un puntaje lo más cercano posible a 21 puntos (incluido), sin excederlos. Una serie de cartas, presentando los valores 2, 3, 4, 7, 8, 9 10 y 11, eran entregadas en una secuencia aleatoria, y el jugador debía elegir en cada paso si pedir una nueva carta, o si quedarse en el puntaje actual. Cuando elegía parar, es el turno de un oponente computacionalmente simulado, y el jugador con el mejor puntaje ganaba. Así, este estudio mostraba la amplitud del fERN directamente influenciada por el *resultado esperado*, en términos de la probabilidad de ganar vs. perder. La amplitud del fERN era mayor cuando los participantes excedían los 21 puntos por pedir una nueva carta teniendo 11 puntos (0.5 para la *probabilidad* de exceder los 21 puntos), que cuando esto ocurría

tras tener 18 puntos (0.77 para la *probabilidad* de exceder los 21 puntos). En línea con lo anterior, la amplitud del fERN fue mayor cuando los sujetos fueron derrotados quedándose en 18 puntos (0.48 para la *probabilidad* de perder), que cuando esto ocurrió tras quedarse en 11 puntos (0.96 para la *probabilidad* de perder).

Los estudios recién revisados dan cuenta de las dos principales interpretaciones de la variable “*resultado esperado*” en la investigación sobre el fERN: una referida al *tamaño* de las ganancias y/o pérdidas (Gehring & Willoughby, 2002; Holroyd, Larsen *et al.*, 2004; Holroyd, Hajcak *et al.*, 2006; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004), y la otra referida a la *probabilidad* de ganar vs. perder (Cohen *et al.*, 2007; Hajcak *et al.*, 2005; Hewig *et al.*, 2007; Holroyd *et al.*, 2009; Potts, *et al.*, 2006). Siguiendo a la primera, la amplitud del fERN reflejaría la diferencia entre el *tamaño* del resultado esperado y el del obtenido. Siguiendo a la segunda, reflejaría la *improbabilidad* de un resultado negativo. Al momento de establecer comparaciones entre estudios, esta distinción parece invisibilizarse. Por lo mismo una meta primaria del proyecto de tesis ejecutado fue clarificar el efecto modulador de *tamaños* y *probabilidades* sobre la amplitud del fERN.

Por otro lado, de acuerdo a la teoría clásica de la toma de decisiones racional en condiciones de riesgo, formulada a partir de los trabajos pioneros de Pascal y Fermat en el siglo XVII (revisado en Trepel, Fox & Poldrack, 2005), la interacción entre el *tamaño* y la *probabilidad* de los resultados en juego, sería lo que finalmente configuraría las expectativas de los agentes racionales. La noción que resume este postulado, formalizando normativamente la idea de *expectativa*, es el concepto de *valor esperado* (VE), dónde el VE es:

$$\begin{aligned} \text{VE} &= x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_n p_n \\ &= \sum_{i=1}^n x_i p_i \end{aligned}$$

En la fórmula,  $x_i$  es el *valor* asociado al *i*-ésimo *resultado*, y  $p_i$  es la *probabilidad* de observar tal resultado. Así por ejemplo, un juego que paga \$400 ( $x_1$ ) con una *probabilidad* de 25% ( $p_1=0.25$ ) y -\$100 ( $x_2$ ) con una *probabilidad* de 75% ( $p_2=0.75$ ), tiene el mismo VE que otro juego que paga \$150 ( $x_3$ ) con una *probabilidad* de 50% ( $p_3=0.5$ ), y -\$100 ( $x_4$ ) con el 50% de *probabilidad* restante ( $p_4=0.5$ ); esto porque en ambos casos la fórmula alcanza el mismo VE,  $x_1p_1 + x_2p_2 = x_3p_3 + x_4p_4 = 2.5\phi$ . Dado que ambos juegos tienen el mismo VE, ambos debieran generar las mismas expectativas, y un agente racional no debiera demostrar ninguna preferencia por ninguno de los dos. En el caso de que alguno de estos juegos fuese sometido a (1) un incremento de la *probabilidad* de ganar, (2) una disminución en el *tamaño* de las posibles pérdidas, o (3) un incremento en el *tamaño* de las posibles ganancias, dicho juego vería su VE incrementado, y un agente racional debiera manifestar una preferencia hacia él.

Si por una parte es cierto que la amplitud del fERN da cuenta de la diferencia entre expectativas y resultados, y por otra es cierto que esas expectativas corresponden al VE, entonces, en situaciones dónde la información respecto de los *tamaños* y *probabilidades* de las ganancias está disponible a los sujetos, el VE debiera predecir la amplitud del fERN. Resultaría esperable que diferentes relaciones *tamaño/probabilidad* de resultados se asociaran a amplitudes equivalentes en la medida que (1) dichas relaciones *tamaño/probabilidad* correspondiesen a valores esperados equivalentes, (2) el tamaño de las pérdidas no variara. Más aún, mientras mayor sea el VE, mayor debiera ser el fERN que sigue a feedback de pérdida. Ahora bien, una teoría reciente señala que la diferencia entre ganancias y pérdidas se explicaría mejor por la existencia de una positividad asociada a resultados mejores que los esperados, que por una negatividad asociada a aquellos peores que los esperados (Holroyd, Pakzad-Vaezi, & Krigolson, 2008). De este modo, también resulta posible que la interacción *tamaño/probabilidad* module el valor

motivacional de los feedbacks positivos en vez de el de los negativos.

Para abordar estos asuntos, se diseñó un juego de azar de cuatro categorías, cada una correspondiente a una configuración particular de *tamaños* y *probabilidades* de ganancia. Dos de estas categorías tienen un VE equivalente, una uno mayor, y otra el menor. El tamaño o monto de las posibles pérdidas no varía entre las categorías, de modo que cualquier diferencia en el fERN asociado a pérdidas se derive de diferentes expectativas resultantes de diferentes configuraciones *tamaño/probabilidad* de las recompensas ofrecidas. Por otra parte, la existencia de dos pares de categorías de juego con *tamaños* equivalentes de las recompensas ofrecidas, y dos pares con *probabilidades* de recompensa equivalentes, permite analizar el efecto modulador de estos factores en ERPs asociados a feedbacks monetarios (ver la Figura 2, explicada en sección “Materiales y Métodos”).

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. El *Error-Related Negativity*

Cuando los humanos cometen errores en tareas de tiempo de reacción, una deflexión negativa aparece en el registro de electroencefalograma (EEG) al momento de la comisión del error. Este fenómeno es visto de mejor forma promediando varios segmentos del EEG, cada uno asociado con una respuesta errónea, para crear un potencial relacionado a eventos (ERP) promedio (para una introducción a los ERPs, ver Coles & Rugg, 1995). El componente del ERP revelado por este procedimiento es conocido como el *error-related negativity* (ERN), o negatividad de error (Ne) (Falkenstein *et al.*, 1990; Gehring *et al.*, 1993). El comienzo del ERN coincide con la iniciación de la respuesta, tal como es determinado por el electromiograma (EMG) asociado a la mano que responde, y llega a su máximo aproximadamente tras 80 ms. La distribución espacial del ERN se encuentra en regiones fronto-centrales del cuero cabelludo, alcanzando sus máximas amplitudes sobre el área motora suplementaria.

Durante los últimos diez a quince años se ha avanzado en dilucidar la naturaleza del sistema que genera el ERN, en términos de estructura y función (Holroyd, Coles *et al.*, 2002; Holroyd *et al.*, 2003; Holroyd *et al.*, 2005). A partir de estos trabajos se ha generado un importante grado de consenso respecto de que el ERN es generado por un *sistema general, de alto nivel, de procesamiento del error*. Por *procesamiento del error* se refiere al sistema involucrado en detectar que se ha producido un error en una tarea y en usar esa información para mejorar el desempeño en tal tarea. Por *general*, se refiere a un sistema altamente flexible, capaz de procesar el error en una amplia variedad de contextos. Por último, por *sistema de alto nivel* se señala que éste está asociado con el control ejecutivo mediado por las áreas frontales del cerebro.

A comienzos de los años noventa, Gehring (1992) mostró que la amplitud del ERN aumentaba en la medida en que los participantes estaban motivados, según el tamaño de la retribución por participar, para buscar la precisión en sus respuestas en una tarea de elección y tiempos de reacción (ver también Gehring *et al.*, 1993). Su trabajo fue el primero en sugerir que el sistema que produce el ERN es sensible a la importancia que el participante asigna al error cometido. En otro estudio, los participantes desarrollaron una tarea de tiempos de reacción de cuatro opciones, presionando botones usando uno de dos dedos de una de sus dos manos. Así el error podía ser cometido con un dedo equivocado, una mano equivocada, o ambos. Se encontró que la magnitud del ERN se incrementaba con el grado del error, siendo mayor cuando la respuesta incorrecta era cometida tanto con la mano como con el dedo equivocado (Bernstein, Scheffers, & Coles, 1995). De este modo el sistema de procesamiento hipotetizado, parecía sensible al grado de error.

En otro experimento, se solicitó a los participantes que presionaran un botón cuando estimaran que un segundo había pasado tras la presentación de un estímulo de alerta. Al final de cada trial, un estímulo de feedback era presentado, indicando si su estimación en ese trial estaba dentro de un rango de éxito. El estímulo que indicaba a los participantes que su respuesta no estaba dentro del rango (feedback negativo) elicó un ERN (Miltner *et al.*, 1997). Es importante notar que, dado que el feedback fue entregado algún tiempo después de que la respuesta ocurrió, el ERN elicó por el feedback se muestra disociado del proceso de generación de la respuesta. Estos resultados demuestran que el ERN no es elicó por el proceso que causa el error, ni por la ausencia de un proceso necesario para efectuar la respuesta correcta, ni por la ejecución de una acción remedial en conjunción al error. En cambio, el experimento revela que el sistema parece comprometido con un aspecto del procesamiento del error que no está directamente



vinculado a la comisión del error. Esta función puede incluir la detección misma del error, o con la utilización de información respecto del error para evitar su repetición.

Los ERNs son elicitados por respuestas incorrectas en una amplia variedad de tareas (revisado en Coles et al., 1998; Holroyd & Coles, 2002). Por lo mismo existe consenso respecto de que el sistema de procesamiento del error que genera al ERN debe ser suficientemente flexible para actuar según metas arbitrarias. Más aun, el sistema tiene que ser sensible a varias fuentes de información sobre el error. En este sentido el ERN puede ser elicitado no sólo por feedbacks negativos y por la comisión de errores con las manos, sino que también por errores cometidos con el pie (Holroyd, Dien, & Coles, 1998) o los ojos (Nieuwenhuis, Ridderinkhof, Blom, Band, & Kok, 2001), indicando que el sistema es sensible a diferentes modalidades de output en la comisión del error. De forma similar, el ERN puede ser elicitado por feedbacks negativos presentados en una modalidad auditiva, visual o somatosensorial, de modo que el sistema debe ser indiferente a la modalidad del input para la información de error (Miltner *et al.*, 1997). Por último, cuándo la velocidad es enfatizada en las instrucciones de la tarea, el ERN también es elicitado por respuestas atrasadas (Johnson, Otten, Boeck, & Coles, 1997; Luu, Flaisch, & Tucker, 2000). En conjunto, la evidencia sugiere un sistema de procesamiento del error altamente flexible a la base del ERN.

Evidencia convergente indica que el ERN debe ser generado en el ACC. Estudios que usan la técnica de *análisis de fuentes eléctricas cerebrales* (BESA, por *brain electric source analysis*; en Scherg, 1990; Scherg & Picton, 1991) han sugerido que el ERN es generado dentro de esa región (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994; Gehring, Himle, & Nisenson, 2000). La técnica BESA llega a una localización en el ACC incluso cuando el ER es elicitado por errores cometidos con el pie (Holroyd *et al.*, 1998), y por feedbacks negativos presentados en las modalidades auditiva y somatosensorial (Miltner *et al.*,

1997). La evidencia neurofisiológica también es consistente con la posición de que el ERN es generado en el ACC. Ya a fines de la década de 1970, Niki y Watanabe (1979) encontraron unidades de reconocimiento del error en el surco cingulado anterior de primates no humanos, activados cuando los animales recibieron feedbacks negativos en la forma de ausencia de una recompensa esperada. De forma similar, Gemba, Sasaki, y Brooks (1986) encontraron que cuando los monos cometen errores en una tarea de respuesta simple, potenciales relacionados al error fueron generados en el surco cingulado anterior. Este descubrimiento llevó a Brooks (1986, 1989) a sugerir que el ACC funciona como un comparador, comparando el resultado de una acción con el resultado buscado. Evidencia posterior ha dado soporte a esta interpretación (Procyk *et al.*, 2000; Shima & Tanji, 1998). Por su parte, varios estudios de neuroimagen funcional han encontrado que el ACC de humanos involucrados en tareas de tiempo de reacción, está más activo en trials de error que en trials correctos. (Braver, Barch, Gray, Molfese, & Snyder, 2001; Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll, & Cohen, 1998; Kiehl, Liddle, & Hopfinger, 2000; Menon, Adleman, White, Glover, & Reiss, 2001; Ullsperger & von Cramon, 2001). En conjunto, la evidencia apoya la idea de una localización en el ACC para la generación del ERN.

Los sistemas frontales del cerebro, incluido el córtex prefrontal (Damasio, 1994; Luria, 1973; Miller & Cohen, 2001; Stuss & Benson, 1986), el ACC (Botvinick, Cohen, Carter, 2004; Devinsky, Morrell, & Vogt, 1995; Posner & DiGirolamo, 1998), y los ganglios basales (Brown, Schneider, & Lidsky, 1997; Cummings, 1993), han sido considerados fundamentales para el control ejecutivo. Se piensa que los sistemas involucrados con la función ejecutiva regulan los aspectos más globales del comportamiento humano, cómo la planificación y la toma de decisiones, y la literatura los presenta especialmente involucrados en tareas novedosas o difíciles (Baddeley, 1986). Un aspecto del control

ejecutivo tiene que ver con el monitoreo de las respuestas, o revisar que las consecuencias de una acción sean consistentes con lo intentado. La naturaleza altamente flexible del sistema de procesamiento del error asociado al ERN es consistente con lo que se esperaría de un sistema de control ejecutivo encargado del monitoreo de la conducta. La distribución frontal-central del ERN, y su supuesta generación en el ACC, también insinúa una asociación entre el ERN y funciones ejecutivas implementadas en regiones frontales. Más aun, el ERN es anormal tanto en individuos con trastorno obsesivo compulsivo (Gehring *et al.*, 2000) como en individuos con daño prefrontal dorsolateral (Gehring & Knight, 2000), condiciones asociadas a disfunciones ejecutivas. Considerado en el contexto de estas evidencias, el sistema a la base del ERN parece contribuir a la regulación de los aspectos más globales del comportamiento humano.

Las observaciones y evidencias presentadas, apoyan dos supuestos críticos para la teoría sobre la generación del ERN, y para este trabajo: (1) que el ERN es generado en el ACC, y (2) que el ERN es elicitado por un sistema de alto nivel para el procesamiento del error.

#### **4.2. El Sistema Mesencefálico Dopaminérgico**

El Sistema Mesencefálico Dopaminérgico está compuesto de una pequeña colección de núcleos que se proyectan difusamente a los ganglios basales y al córtex (Berger, Gaspar, & Verney, 1991; Gaspar, Berger, Febvret, Vigny, & Henry, 1989; Haber & Fudge, 1997; Williams & Goldman-Rakic, 1993). Estos núcleos incluyen la sustancia nigra pars compacta y el área ventral tegmental (VTA). En la rata, las proyecciones corticales tienden a hacer sinapsis sobre el córtex frontal medial, incluyendo al ACC; en primates, las proyecciones están más ampliamente diseminadas, pero también alcanzan su mayor

densidad sobre las regiones mediales del córtex frontal (Berger et al., 1991; Gaspar et al., 1989; Williams & Goldman-Rakic, 1993). Los terminales de las neuronas dopaminérgicas en los ganglios basales (Smith & Bolam, 1990) y el córtex prefrontal (Smiley, Williams, Szigeti, & Goldman-Rakic, 1992) terminan en “triadas sinápticas”, en las cuales el axón de una neurona dopaminérgica hace contacto con una sinapsis local. En los ganglios basales, las sinapsis están compuestas de la dendrita de una célula espinosa lindando con el axón de una célula piramidal; en el córtex frontal, consisten en el axón de una célula piramidal haciendo sinapsis con la dendrita de otra neurona del mismo tipo.

En la década de 1950, Olds y Milner (1954) descubrieron que las ratas se empeñan en conductas, como presionar una palanca, tras el envío de corriente a través de electrodos estimulantes en ciertas regiones del cerebro. Se observó que la estimulación fue reforzadora, pues las ratas gradualmente incrementaron la frecuencia con la cual se empeñaban en conductas que eran seguidas por dicha estimulación. Esta observación precipitó la búsqueda de los sustratos neurales del aprendizaje por reforzamiento, cuyos resultados implicaron al sistema mesencefálico de dopamina (revisado en Schultz, 2009).

Evidencia acumulada sugiere que el sistema mesencefálico de dopamina puede facilitar tanto el fortalecimiento como el debilitamiento a largo plazo de conexiones en sus terminales sinápticos (Calabresi, Pisani, Mercuri, & Bernardi, 1996; Wickens & Kotter, 1995), y que este sistema de aprendizaje sigue requisitos temporales estrictos, donde la señal de reforzamiento debe coincidir con la actividad de procesos pre y post-sinápticos (Wickens, Begg, & Arbuthnott, 1996).

Originalmente, se creía ampliamente que el sistema mesencefálico de dopamina contribuía al aprendizaje por reforzamiento, mediando la sensación de satisfacción vivenciada por un animal tras recibir un refuerzo. En esta línea R. A. Wise y colegas señalaron: “In introspective language we would say that neuroleptics [that disrupt the

midbrain dopamine system] appear to take the pleasure out of normally rewarding brain stimulation, take the euphoria out of normally rewarding amphetamine, and take the “goodness” out of normally rewarding food”. (Wise, Spindler, DeWit, & Gerber, 1978, pp. 263).

Ahora bien, nuestra comprensión del rol que la dopamina mesencefálica juega en el aprendizaje por reforzamiento a evolucionado significativamente durante los último 15 o 20 años; y aunque la hipótesis “hedonista” suele reaparecer, esta ha sido desconfirmada. El trabajo de Schultz y colegas ha sido particularmente influyente en este cambio de visión (Schultz, Romo, Ljungberg, Mirenowicz, Hollerman, & Dickinson, 1995; revisado en Schultz, 1997, 1998, 2009). El equipo de Schultz ha registrado la actividad de células dopaminérgicas mesencefálicas en monos mientras aprenden a desarrollar varias tareas. En una tarea típica, un mono debe presionar una palanca cada vez que aparece una luz verde, y es reforzado cuando hace esto. Antes de que el mono aprende como desarrollar la tarea, la presentación de recompensa elicit una respuesta fásica en las neuronas dopaminérgicas. Esta observación es consistente con la hipótesis que dice que la actividad del sistema mesencefálico de dopamina codifica el aspecto hedónico de los refuerzos. Ahora bien, una vez que el mono ha aprendido a desarrollar la tarea correctamente, la presentación del refuerzo ya no elicit las respuestas dopaminérgicas en fase (Ljungberg, Apicella, & Schultz, 1992; Schultz, Apicella, & Ljungberg, 1993). En cambio, el estímulo condicionado (ej. luz verde) elicit esta actividad. Con el aprendizaje, la señal dopaminérgica se “propaga atrás en el tiempo”, desde el momento en que el refuerzo es entregado hasta el inicio del trial, cuando el estímulo condicionado es presentado. De este modo el sistema dopaminérgico mesencefálico se activa en anticipación de una recompensa por venir, y no por la entrega de la respuesta en sí misma. Dado que el aspecto hedónico del reforzamiento está presumiblemente asociado

sólo con la consumación de la recompensa, la presencia de actividad dopaminérgica previa a la presentación de esta recompensa es inconsistente con la hipótesis de que el sistema mesencefálico de dopamina realmente codifica el placer elicitado por el refuerzo.

Luego de que el mono tiene algo de práctica en la tarea en el mismo experimento, cuando un refuerzo no es entregado, las neuronas dopaminérgicas del mesencéfalo disminuyen su tasa de disparo en el tiempo en que el refuerzo hubiese sido entregado (Bayer & Glimcher, 2005). La actividad dopaminérgica también cae bajo la línea de base cuando se presenta a los monos un estímulo que predice castigo (Mirenowicz & Schultz, 1996). Lo mismo en estudios con conejos (Guarraci & Kapp, 1999).

Schultz y colegas han propuesto que las neuronas dopaminérgicas son sensibles a cambios en la predicción de la “bondad” de los eventos que ocurren. Una señal dopaminérgica positiva es elicitada cuando un evento es mejor que lo esperado, y una señal dopaminérgica negativa es elicitada cuando un evento es peor que lo esperado. Dado que las teorías del aprendizaje especifican que el aprendizaje ocurre cuando un evento es impredecible (Rescorla & Wagner, 1972), estas observaciones entregan luces respecto de cómo un algoritmo de aprendizaje por reforzamiento puede ser implementado por un sistema natural. En esta línea, Schultz y colegas han sugerido que las respuestas en fase vistas en las neuronas dopaminérgicas pueden servir como señal de error, usada para ajustar la fuerza asociativa de estímulos y respuestas en áreas neurales que reciben inputs desde el sistema dopaminérgico mesencefálico (Schultz *et al.*, 1995; revisado en Schultz, 2009).

Varios grupos de investigadores (Barto, 1995; Fiorillo, Tobler, & Schultz, 2003; Nakahara, Itoh, Kawagoe, Takikawa & Hikosaka, 2004; Pan, Schmidt, Wickens & Hyland, 2005) han notado similitudes entre la actividad fásica del sistema dopaminérgico mesencefálico y una señal de error particular, denominada *temporal difference error* (error

TD), asociada a un algoritmo de aprendizaje por reforzamiento llamado *método de diferencias temporales* (Sutton, 1988; revisado en Sutton & Barto, 1998). Este algoritmo tiene sus raíces tanto en la inteligencia artificial (Sutton & Barto, 1998) como en la teoría del aprendizaje animal (Sutton & Barto, 1990) y es una generalización de la regla de aprendizaje de Rescorla–Wagner (Rescorla & Wagner, 1972) al dominio del tiempo continuo. En modelos de redes neuronales, los errores TD son computados por un “crítico adaptativo”, que asocia un valor con los eventos en curso y genera un error TD cuando estos no siguen sus predicciones: Errores TD positivos indican que los eventos son “mejores” que lo esperado, y errores TD negativos indican que son “peores” que lo esperado. Típicamente, un módulo de selección de respuesta llamado “actor” o “controlador motor” usa la señal de error para reforzar conductas que alcanzan errores TD nulos o positivos. El método de las diferencias temporales da cuenta de un amplio rango de fenómenos comportamentales, incluyendo todas las observaciones predichas por el modelo Rescorla–Wagner, y varias observaciones que son inconsistentes con él (Sutton & Barto, 1990).

Es importante notar que, tal como la actividad dopaminérgica en fase, los errores TD se propagan atrás en el tiempo con el aprendizaje, desde el refuerzo al estímulo condicionado. También, cómo la actividad dopaminérgica referida, un error TD es elicitado en la ausencia de un refuerzo esperado. Estas observaciones llevan naturalmente a la hipótesis de que el sistema dopaminérgico mesencefálico genera una señal de error TD.

Aunque no es universalmente aceptado (Berridge & Robinson, 1998; Pennartz, 1996; Redgrave, Prescott, & Gurney, 1999), la hipótesis de la diferencia temporal en la función dopaminérgica mesencefálica ha sido muy influyente. En parte, la hipótesis ha tenido una buena respuesta por ensamblar con concepciones previas sobre la relación

entre la dopamina mesencefálica y el aprendizaje por reforzamiento, y porque la implementación en redes neuronales artificiales del método de diferencias temporales contiene propiedades formales que son consistentes con la estructura y función del sistema dopaminérgico mesencefálico (revisado en Holroyd, 2001).

Las observaciones presentadas en esta sección apoyan dos supuestos críticos para explicar la generación del fERN: (1) que el sistema dopaminérgico mesencefálico genera señales de error de predicción, y (2) que esas señales son utilizadas por otras estructuras del cerebro para el aprendizaje por reforzamiento.

### **4.3. El Córtex Cingulado Anterior**

Impresionado por la diversidad de inputs corticales y subcorticales en el Córtex Cingulado Anterior (ACC), los investigadores desde los años 90s han considerado a ésta como el área en que las intenciones motoras se transforman en acciones (Bentivoglio, Kultas-Illinsky, & Illinsky, 1993; Morecraft & Van Hoesen, 1998; Morecraft, Van Hoesen, & Maynard, 1989; Van Hoesen, Morecraft, & Vogt, 1993). En el cerebro primate, el córtex cingulado anterior contiene áreas motoras somatotópicamente representadas en la profundidad del surco cingulado (Picard & Strick, 1996). El surco cingulado humano es una característica prominente del muro medial, componiendo cerca de la mitad de su superficie (Vogt, Nimchinsky, Vogt, & Hof, 1995), y el surco cingulado anterior se distingue por grandes células piramidales en la capa V, con extensa arborización dendrítica (Vogt, Sikes & Vogt, 1993). Estas neuronas se proyectan a otras áreas motoras, incluyendo ganglios basales, área motora suplementaria, área motora primaria, y médula espinal (Dum & Strick, 1993; Van Hoesen et al., 1993). Estudios de registro de unidades individuales, estimulación intracortical, y de neuroimagen funcional, han revelado que las



áreas motoras cinguladas contribuyen a la generación y ejecución del movimiento (revisado en Diehl, Dinner, Mohamed, Najm, Klem, LaPresto, Bingaman, Lüders, 2000).

El ACC recibe inputs de varias áreas involucradas en la dirección de comportamientos motores. Por ejemplo, recibe proyecciones ampliamente esparcidas desde el córtex orbitofrontal, la amígdala y fuentes nociceptivas; por lo mismo se ha postulado que el ACC provee una vía crítica para que factores emocionales y motivacionales influyeran la actividad motora (Morecraft & Van Hoesen, 1998, Van Hoesen *et al.*, 1993; Vogt, *et al.*, 1993). Por su parte, la región ventral del surco cingulado está ricamente interconectada con el córtex prefrontal dorsolateral (Bates & Goldman-Rakic, 1993; Van Hoesen *et al.*, 1993). Se piensa que el córtex prefrontal dorsolateral está involucrado en la generación de conductas apropiadas al contexto en la ausencia de estimulación externa, y en la producción de nuevas respuestas (Jahanshahi *et al.*, 1995; Channon & Crawford, 1999). Como resultado algunos investigadores han sugerido que el área motora anterior cingulada provee una importante ruta para que el córtex prefrontal dorsolateral influya en los outputs motores (Bates & Goldman-Rakic, 1993; Morecraft & Van Hoesen, 1991; Van Hoesen *et al.*, 1993). El ACC es también altamente activado cuando dos o más respuestas incompatibles son activadas de forma simultánea (revisado en Botvinick *et al.*, 2001; Botvinick, 2007), sugiriendo que el ACC está involucrado en resolver (Paus, Petrides, Evans, & Meyer, 1993) o detectar (Botvinick *et al.*, 2001) conflicto de respuestas.

El involucramiento del ACC en el control motor de alto nivel está apoyado por investigación neurofisiológica. Por ejemplo, lesiones frontales mediales, que incluyen al ACC, pueden producir mutismo acinético, condición en la cual el paciente parece haber perdido la voluntad o motivación por generar conductas, aun si él o ella es físicamente capaz de hacerlo (Damasio & Van Hoesen, 1983; Devinsky *et al.*, 1995). Por otro lado, la

disfunción del ACC está asociada a trastorno obsesivo-compulsivo, condición caracterizada por una excesiva preocupación respecto de los outputs motores. (Devinsky et al., 1995). En conjunto, la evidencia indica que las áreas motoras del ACC están en una posición pivote para usar sus diversos inputs neurales contribuyendo a la planificación, generación y ejecución del comportamiento (revisado en Botvinick, 2007).

#### **4.4. Aprendizaje en el Córtex Cingulado Anterior**

El involucramiento del ACC en la adquisición de nuevos comportamientos parece limitarse a las primeras etapas del aprendizaje, cuando las tareas son más nuevas y difíciles. En estudios de Gabriel (1993), se enseñaba a conejos a diferenciar una entre dos claves (típicamente tonos musicales), uno de los cuales (Do#) era consistentemente seguido de un estímulo aversivo (un golpe eléctrico en el pie). Demostraron que las neuronas en el ACC discriminaban entre el Do# y otras notas durante las primeras etapas de la tarea, y que la actividad discriminatoria “se movía” desde las áreas anteriores hasta las posteriores del cerebro, mientras avanzaba en aprendizaje (Gabriel, 1993; ver también Bussey, Muir, Everitt, & Robbins, 1996).

Estudios de neuroimagen funcional en humanos han revelado una secuencia de activación comparable. Por ejemplo, en experimentos de aprendizaje por ensayo y error, el córtex cingulado anterior (y el córtex prefrontal dorsolateral) se ha visto activado durante las primeras etapas de la tarea, pero su contribución ha disminuido a medida que la tarea se vuelve “sobre-aprendida” (Jenkins, Brooks, Nixon, Frackowiak, & Passingham, 1994; Toni & Passingham, 1999).

Durante las primeras etapas del aprendizaje las áreas motoras cinguladas anteriores parecen usar específicamente información sobre errores y recompensas para identificar y

seleccionar comportamientos apropiados. En monos, el potencial de error descubierto por Brooks (1989) en el surco cingulado anterior, ocurre sólo durante las primeras etapas de las tareas, cuando los monos aprenden que es requerido de ellos. Brooks (1989) argumenta que el ACC contribuye al aprendizaje sólo cuando certidumbre e incertidumbre están equilibradas, durante el proceso de distinguir entre lo apropiado e inapropiado en el contexto de la tarea. Esta posición es apoyada por la observación de que mientras los monos aprenden una secuencia de movimientos por ensayo y error, un grupo de neuronas en el surco cingulado anterior está más activa en la temprana etapa “de búsqueda”, mientras un segundo grupo de neuronas es más activo durante una posterior etapa “de repetición” (Procyk *et al.*, 2000). Más aun, luego de una reducción de una recompensa esperada, células en el surco cingulado anterior muestran cambios en su actividad como correlato de la preparación de los monos para cambiar de una respuesta no-exitosa a una respuesta diferente. Cuando esta área es desactivada (por aplicación tópica de muscimol, agonista de los receptores GABA<sub>A</sub>), los monos son incapaces de cambiar a respuestas más adaptativas, indicando que sería incapaz de usar información relativa a la reducción en la recompensa (Shima & Tanji, 1998). De este modo, las áreas motoras cinguladas anteriores parecen involucradas en seleccionar nuevas respuestas cuando los resultados de un trial no son satisfactorios.

En humanos, experimentos de neuroimagen funcional también han sugerido que el ACC usa información sobre recompensas y errores para identificar y seleccionar conductas apropiadas. El ACC se ha visto activado tanto tras recompensas como tras castigos monetarios, con el ACC derecho relativamente más sensible a castigos monetarios que a recompensas (Knutson, Westdorp, Kaiser, & Hommer, 2000). En otro estudio, los sujetos usaron feedbacks que recibían entre trials (las palabras “correcto” e “incorrecto”), para desarrollar hipótesis acerca de cómo responder mejor en la tarea. Se

encontró que una región correspondiente a la zona ventral del ACC estaba más activada cuando los sujetos construían hipótesis y realizaban una elección, que cuando sólo construían una hipótesis, o sólo realizaban una elección (Elliott & Dolan, 1998). Los autores sugieren que esta activación del ACC ventral en parte refleja un procesamiento evaluativo relativo a las consecuencias emocionales de realizar una elección.

En ratas, neuronas en el córtex prefrontal medial predicen la adquisición de recompensas, con algunas neuronas distinguiendo entre juegos que entregan bajas y altas recompensas (Pratt & Mizumori, 2001). El ACC en la rata parece organizarse topográficamente, con partes rostrales y ventrales representando atributos de los estímulos que predicen recompensa o su ausencia, y partes caudales y dorsales relacionadas a la ejecución de conductas instrumentalmente aprendidas (Takenouchi, Nishijo, Uwano, Tamura, Takigawa, & Ono, 1999). Resulta relevante que los inputs dopaminérgicos en el córtex prefrontal medial cambian cada vez que la presentación de una recompensa alimenticia, contingente a las respuestas, se desvía de lo que el animal ha llegado a esperar (Richardson & Gratton, 1998).

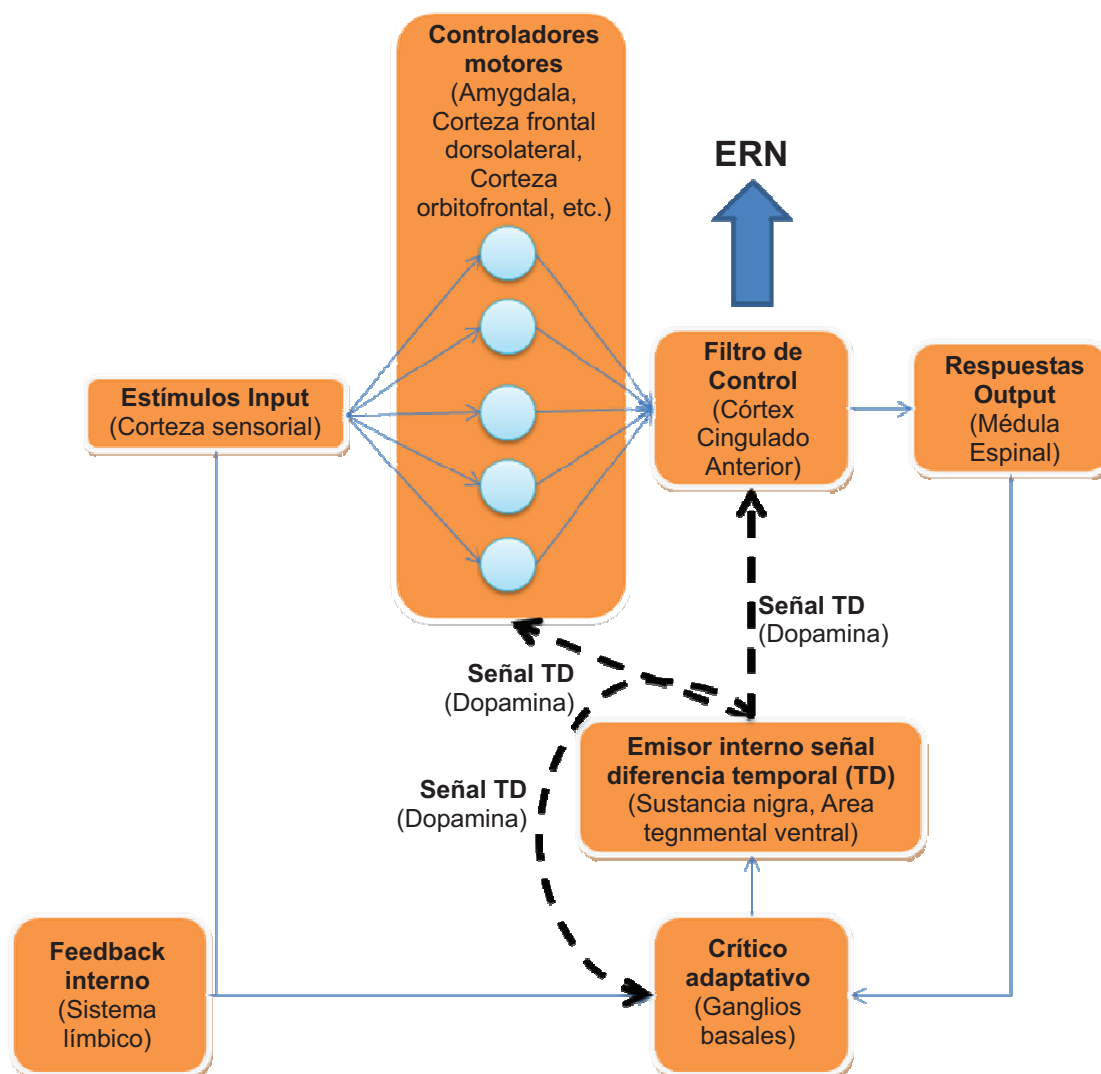
Dado que las neuronas dopaminérgicas del mesencéfalo hacen sinapsis en neuronas motoras en el ACC, podría esperarse que el ACC contribuya al aprendizaje por reforzamiento. De hecho, desde larga data se ha pensado que el córtex prefrontal medial está involucrado en el aprendizaje por reforzamiento, dado que es una de las pocas áreas corticales que soporta auto-estimulación intracraneal en la rata (Olds & Milner, 1954; Routtenberg & Sloan, 1972) y dado que niveles incrementados de dopamina se han encontrado en la región tras auto-estimulación (Mora & Myers, 1977).

Las observaciones presentadas en esta sección apoyan tres supuestos críticos para la hipótesis sobre la generación del fERN: (1) Las áreas motoras cinguladas anteriores están comprometidas como locus neural dónde planes motores de alto nivel son

mapeados en acciones; (2) que el ACC está involucrado en aprender estos mapeos; y (3) que este aprendizaje es dirigido en parte por información relativa a las recompensas enviada al ACC por el sistema mesencefálico de dopamina.

#### **4.5. El mecanismo de Generación del *Error-Related Negativity***

Según varias publicaciones de Clay Holroyd, Michael Coles y otros autores (Holroyd & Coles, 2002; Holroyd *et al.*, 2002; Holroyd *et al.*, 2003; Nieuwenhuis *et al.*, 2004; Holroyd *et al.*, 2005), el ERN estaría vinculado a un mecanismo neuronal para el aprendizaje por reforzamiento. En concreto reflejaría la acción de un mecanismo que involucraría principalmente a los ganglios basales, el sistema dopaminérgico mesencefálico y al córtex cingulado anterior. Esta teoría es conocida como la *reinforcement learning theory* del ERN.



**Figura 1:** Esquema de la *reinforcement learning theory* del ERN. Las cajas hacen referencia a los componentes asociados al algoritmo de aprendizaje por diferencias temporales (Sutton, 1988; revisado en Sutton & Barto, 1998). El sustrato neural correspondiente según la teoría expuesta, es presentado entre paréntesis.

Los ganglios basales estarían continuamente evaluando los eventos externos y contrastándolos con las expectativas del sistema cognitivo respecto de los mismos. Cuando los resultados fueran mejores que los esperados, se produciría un incremento en la actividad de las neuronas dopaminérgicas del mesencéfalo, y cuando estos fueran peores que los esperados, una disminución en la actividad de las mismas, de modo que

esta disminución sería proporcional a la diferencia entre los resultados efectivos y los resultados esperados. En este último caso, el descenso en los niveles de dopamina llegaría al córtex cingulado anterior como señal para la optimización del desempeño en la tarea en curso. A la vez, desinhibiría las dendritas apicales de las neuronas motoras del córtex frontal; lo que finalmente sería la causa directa del ERN. Esta tesis está avalada no sólo por hallazgos anatómico funcionales, sino también por modelos computacionales que producen, en condiciones simuladas, ERNs de amplitud similar a los hallados en el cerebro biológico ante condiciones similares (ver por ejemplo Holroyd & Coles, 2002).

Ahora bien, una teoría reciente señala que la diferencia entre ganancias y pérdidas se explicaría mejor por la existencia de una positividad asociada a resultados mejores que los esperados, que por una negatividad asociada a aquellos peores que los esperados (Holroyd et al., 2008).

Trabajos recientes con ERPs proponen que los mecanismos de procesamiento podrían variar entre respuestas correctas e incorrectas, o entre feedback positivos y negativos (Cohen, et al., 2007). Se ha acuñado el nombre de *feedback correct-related positivity* (fCRP), argumentando que las diferencias entre trials correctos e incorrectos, se explicaría mejor por la existencia de una positividad asociada a los primeros que por una negatividad asociada a los segundos (Holroyd et al., 2008).

La hipótesis del fCRP ha sido formulada para entender la existencia de modulación del fERN por distintos tamaño o probabilidad de feedbacks positivos, y no por distintos tamaños o probabilidad feedbacks negativos. En vez de evocar un componente específico para los trials de error, los feedbacks negativos simplemente elicitarían un fenómeno común, el N200 (una negatividad en torno a los 200 ms. tras la aparición del feedback), el cuál es elicitado por eventos relevantes a las tareas en general (Towey, Rist, Hakerem, Ruchkin, & Sutton, 1980). La positividad en los trials correctos, o reforzados, reflejarían o

la inhibición del proceso que induce al N200, y/o la superposición de una deflexión positiva fronto-central (última posibilidad apoyada por Holroyd et al., 2008).

La *reinforcement learning theory* del ERN (Holroyd & Coles, 2002), aplicada a los trials correctos (Holroyd, 2004), dice que una señal positiva de error de predicción, que indica que los eventos son mejores que los esperados, vista como un incremento en la actividad en fase de las neuronas dopaminérgicas mesencefálicas, es enviada al ACC, donde genera el fCRP por inhibir las dendritas apicales de las neuronas motoras presentes en él (Holroyd et al., 2008).



## 5. MARCO METODOLÓGICO

### 5.1. Objetivos de la Investigación

#### 5.1.1. Objetivo general

- Investigar la amplitud del *feedback error-related negativity* en el contexto de juegos con distintos valores esperados, como resultado de distintas relaciones entre tamaño de recompensa y distribución de probabilidad entre resultados posibles.

#### 5.1.2. Objetivos específicos

1. Determinar si el *feedback error-related negativity* distingue entre trials que implican ganancia y trials que implican pérdida monetaria.
2. Determinar el efecto modulador del tamaño de las recompensas ofrecidas sobre la amplitud del *feedback error-related negativity*.
3. Determinar el efecto modulador de la probabilidad de recompensa sobre la amplitud del *feedback error-related negativity*.
4. Determinar el efecto modulador del valor esperado sobre la amplitud del *feedback error-related negativity*.
5. Analizar si los factores estudiados en el marco de los objetivos 2, 3 y 4, afectan de un modo distinto la amplitud del *feedback error-related negativity* cuando se asocia a ganancias y a pérdidas.

## 5.2. Preguntas de investigación

1. ¿Distinguirá el *feedback error-related negativity* entre trials ganados y perdidos en un juego de azar?
2. ¿Existirá efectos moduladores de los dos factores que componen el valor esperado de un juego de azar (tamaño y probabilidad de los posibles resultados), sobre la amplitud del *feedback error-related negativity*?
3. ¿Existirá diferencias entre el *feedback error-related negativity* asociado a trials ganados y el asociado a trials perdidos, respecto del efecto modulador de los factores que componen el valor esperado?

### 5.3. Hipótesis de trabajo

**H<sub>1</sub>**: La amplitud del *feedback error-related negativity* que sigue a trials ganados se distinguirá significativamente de la del *feedback error-related negativity* que sigue a trials perdidos.

H<sub>01</sub>: La amplitud del *feedback error-related negativity* que sigue a trials ganados no se distinguirá significativamente de la del *feedback error-related negativity* que sigue a trials perdidos.

**H<sub>2</sub>**: Dentro de los trials perdidos, la amplitud del *feedback error-related negativity* será mayor mientras mayor sea la probabilidad de ganar, y mayor la recompensa no conseguida.

H<sub>02</sub>: Dentro de los trials perdidos la amplitud del *feedback error-related negativity* no distinguirá entre tamaños de recompensas ofrecidas, ni entre distribuciones de probabilidad entre posibles resultados

H<sub>A2</sub>: Dentro de los trials perdidos la amplitud del *feedback error-related negativity* no discriminará o según tamaños, o según probabilidad de recompensas ofrecidas; o alguna de las diferencias se dará en una dirección distinta a la planteada en H2.

**H<sub>3</sub>**: Dentro de los trials ganados, la amplitud del *feedback error-related negativity* será menor (menos negativa o más positiva) mientras menor sea la probabilidad de ganar, y mayor la recompensa conseguida.

H<sub>03</sub>: Dentro de los trials ganados la amplitud del *feedback error-related negativity* no distinguirá entre tamaños de recompensas ofrecidas, ni entre distribuciones de probabilidad entre posibles resultados

H<sub>A3</sub>: Dentro de los trials ganados la amplitud del *feedback error-related negativity* no discriminará o según tamaños, o según probabilidad de recompensas ofrecidas; o alguna de las diferencias se dará en una dirección distinta a la planteada en H3.

## 5.4. Materiales y Métodos

### 5.4.1. Participantes

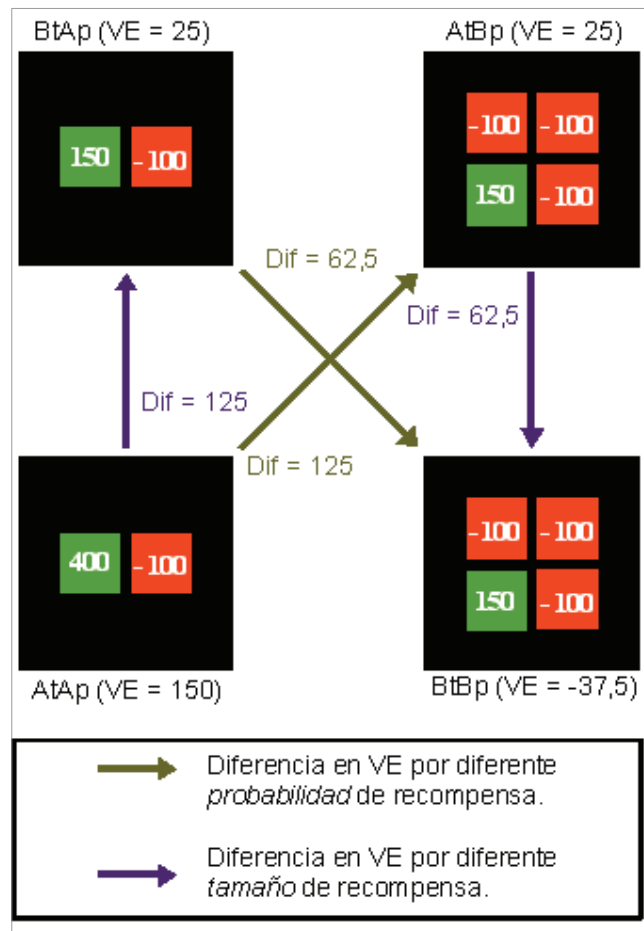
Un total de 22 participantes, todos diestros, reclutados entre la población estudiantil de la Facultad de Psicología de la Universidad Diego Portales, formaron parte del experimento (12 hombres y 10 mujeres 10; Edad media (M) = 20.68 años, Desviación Estándar (SD) = 1.12, en un rango de 19 a 23 años; sin diferencias de edad por género [ $t = -0.30$ ,  $p = 0.76$ ]). Los participantes declararon no presentar problemas visuales; ni desordenes psiquiátricos o neurológicos actuales o pasados. Todos los participantes fueron retribuidos con el dinero acumulado durante la tarea. Todos firmaron un consentimiento voluntario acorde a la Declaración de Helsinki. Para el análisis de potenciales relacionados a eventos, se excluyó a 4 participantes por movimientos oculares y artefactos excesivos durante el registro.

### 5.4.2. Diseño de paradigma

Se diseñó un juego que emula una ruleta de sorteo. Éste presenta cuatro categorías de juego, cada una mostrando una carta verde representando una posible ganancia (\$400 o \$150) y o una o tres cartas rojas mostrando una posible pérdida (-\$100). Como más adelante se explica, en la sección de procedimiento experimental, un software selecciona pseudo-aleatoriamente una de las dos o cuatro cartas presentadas, como resultado de cada juego individual. De este modo, la *probabilidad* de ganar queda definida por la proporción de cartas verdes (siempre una) y de cartas rojas (una o tres). El tamaño de las ganancias y pérdidas es definido por los valores contenidos en las cartas. A partir de este diseño, dos niveles emergen en términos de *probabilidad* de ganar vs. perder (ALTA-*probabilidad* = 50%, y BAJA-*probabilidad* = 25%), y otros dos en términos de *tamaño* de las posibles ganancias (ALTO-*tamaño* = \$400, y BAJO-*tamaño* = \$150). Dos de las

categorías, BAJO-*tamaño*-ALTA-*probabilidad* de recompensa (BtAp) y ALTO-*tamaño*-BAJA-*probabilidad* de recompensa (AtBp), tienen VE equivalentes, a pesar de tener distintas relaciones entre *tamaño* y *probabilidad* de recompensas (ver Figura 2).

Para medir los efectos diferenciados de *tamaño* y *probabilidad* de recompensas, se definieron las otras dos categorías: ALTO-*tamaño*-ALTA-*probabilidad* de recompensa (AtAp) y BAJO-*tamaño*-BAJA-*probabilidad* de recompensa (BtBp). Cada una de estas categorías es equivalente en *tamaño* o *probabilidad* con una de las dos categorías previamente mencionadas (equivalencias por *tamaño*: At [AtAp y AtBp]; Bt [BtBp y BtAp]; equivalencias por *probabilidad*: Ap [AtAp y BtAp]; Bp [BtBp y AtBp]). A partir de estas equivalencias, fue posible evaluar el efecto de ALTO vs. BAJO *tamaño*, comparando el resultado de colapsar AtAp y AtBp con el resultado de colapsar BtAp y BtBp. Así también fue posible evaluar el efecto de ALTA vs. BAJA *probabilidad*, comparando el resultado de colapsar AtAp y BtAp con el de colapsar AtBp y BtBp (La Figura 2 muestra las relaciones entre las cuatro categorías diseñadas).



**Figura 2:** Valor esperado (VE) asociado a cada categoría de juego, y relaciones numéricas entre ellas. Entre las categorías que comparten el mismo *tamaño* en las recompensas potenciales, se observan diferencias debidas a distintas probabilidades de ganar (1/2 o 1/4). Entre las categorías que comparten la misma *probabilidad* de recompensa, se observan diferencias debidas al *tamaño* de las potenciales recompensas positivas (\$400 o \$150).

### 5.4.3. Procedimiento experimental

Antes del experimento, todos los participantes fueron informados respecto de sus propósitos: “investigar las reacciones del cerebro ante un juego de suerte y habilidad”. Tras recibir verbalmente las instrucciones respecto de las reglas básicas del juego, y tras ofrecerles la retribución equivalente al monto acumulado al final del mismo, participaron en 15 trials de práctica y entregaron su consentimiento escrito para su participación en el experimento.

Cada trial comenzó con la presentación de una cruz de fijación visual durante 1000

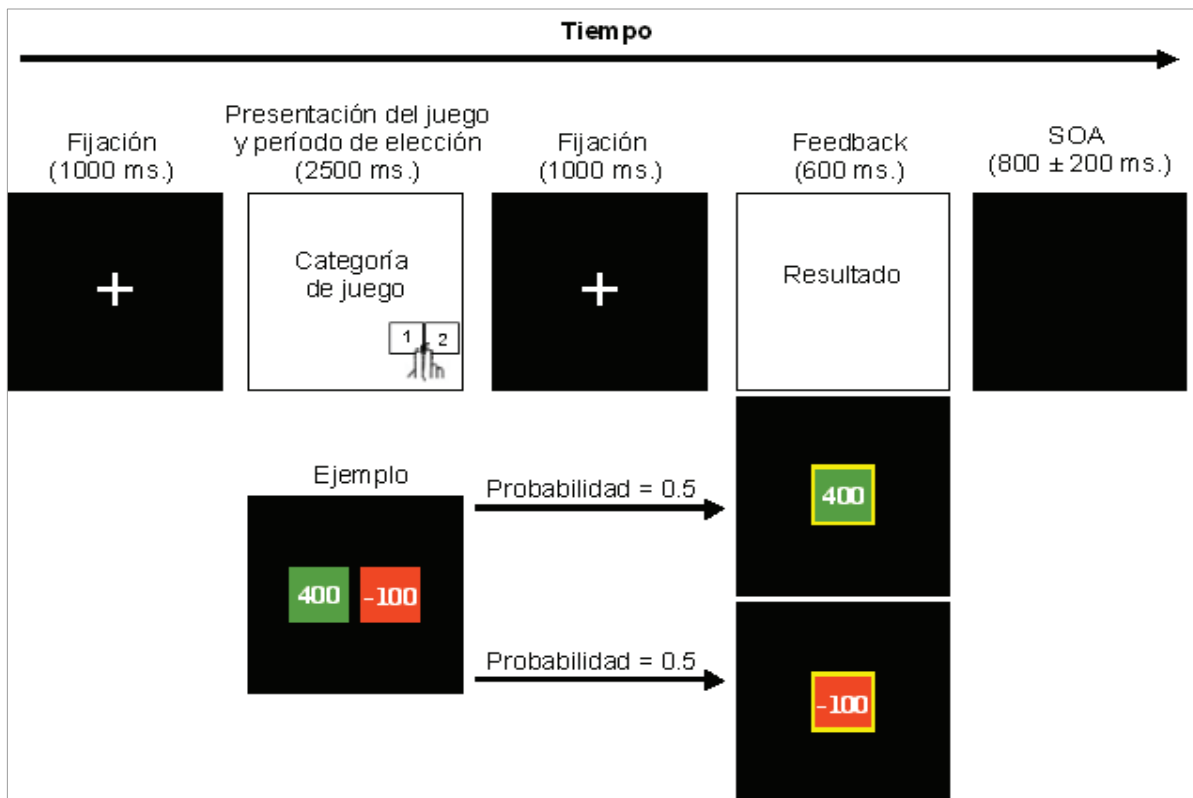
ms., centrada en una pantalla de fondo negro. La cruz fue seguida por la presentación de las cartas correspondientes a una de las categorías de juego (AtAp, AtBp, BtAp o BtBp) durante 2500 ms., es decir, la presentación simultánea y centrada respecto de la pantalla de 2 o 4 cuadros, uno verde mostrando una potencial ganancia (con valor \$400 o \$150), y el resto en rojo mostrando una potencial pérdida (-\$100). El programa definió aleatoriamente la posición específica del cuadro verde dentro de la pantalla para la presentación de cada juego. Así, en las categorías Ap, asignaba un 50% de probabilidades a la aparición de una carta verde a la izquierda, y otro 50% de probabilidades a la derecha. En las categorías Bp, el programa asignó un 25% de probabilidades para cada posible ubicación del cuadro verde (arriba a la derecha, arriba a la izquierda, abajo a la derecha, abajo a la izquierda). El programa ubicaba las cartas rojas en los lugares no ocupados por la carta verde.

Tras la aparición de las cartas, y antes de que expiren los 2500 ms., los participantes tenían que decidir entre dos botones que, metafóricamente para ellos, representan “dos crupieres que pueden hacer girar la ruleta”. El botón elegido activaba un sistema que pseudo-aleatoriamente seleccionaba una de las cartas y, tras una segunda cruz de fijación, la mostraba como resultado del trial durante 600 ms. El momento de la aparición de este resultado, o feedbacks, fue utilizado para la extracción de los potenciales relacionados a eventos. Cuando los participantes no respondían antes de la extinción de los 2500 ms., eran penalizados entregándoles -\$100 como resultado del juego.

Dado que el color por sí mismo no produce ningún efecto en modulación del fERN (Gehring & Willoughby, 2002), se usaron diferentes colores para facilitar la discriminación de montos positivos y negativos. Cuadros verdes fueron usados para los primeros y rojos para los últimos. Además, para facilitar la diferenciación entre condiciones de juego y resultados, los cuadros correspondientes a resultados fueron presentados con un marco

amarillo. Finalmente, para facilitar la diferenciación entre un resultado de -\$100 normal, y uno por penalización por tiempo excedido, los últimos fueron presentados en cuadros naranjos.

Cada trial finalizaba con una asincronía de presentación de estímulos (SOA por *stimulus onset asynchrony*) de  $800 \pm 200$  ms. La Figura 3 muestra la secuencia temporal para cada trial, el ejemplo de una de las cuatro posibles categorías de juego, y los resultados posibles dado ese ejemplo.



**Figura 3:** Secuencia de eventos durante un trial individual del juego diseñado. Los participantes debían decidir en cada trial entre dos botones que activaban la selección pseudo-aleatoria de una de las cartas presentadas en el juego, de acuerdo a una probabilidad condicional definida por la proporción de cartas que muestran cada resultado posible. La carta sorteada se transforma en el resultado del trial. La figura muestra el ejemplo de un juego de ALTO\_tamaño-ALTA\_probabilidad de recompensa (AtAp), junto a sus posibles resultados.

Los participantes jugaron 40 bloques, de 10 trials cada uno. Cada 10 bloques fueron



informados respecto del monto acumulado hasta ese momento. Dentro de cada bloque, las cuatro condiciones fueron presentadas aleatoriamente, y dentro del total de 400 trials cada una tuvo un promedio de presentación de 100 trials (SD = 3,7). De acuerdo a sus resultados en el juego, los participantes recibieron una retribución media de \$18.220 (SD = \$3102), correspondiente al monto acumulado a través de los trials.

Una vez concluida la tarea con registro de EEG, se solicitó a los participantes contestar un cuestionario tipo Likert, evaluando en una escala de 1 a 5 su frustración-satisfacción tras cada posible resultado en cada una de las cuatro categorías de juego. En esta escala, 1 corresponde al mayor disgusto o frustración, y 5 a la mayor satisfacción.

Para validar los estímulos y el procedimiento experimental, se condujo un estudio previo al que aborda las preguntas de esta investigación de tesis (ver ANEXO 1: “Resultados Complementarios”) el cuál evidencio que: (1) los participantes comprenden las instrucciones y el procedimiento para jugar, (2) las cuatro categorías de juego resultan atractivas y motivantes, al tiempo que se dan diferencias predecibles dadas las diferentes configuraciones de *tamaño-probabilidad* de recompensa, (3) los participantes perciben adecuadamente las categorías de juego antes de seleccionar un botón de respuesta, (4) los participantes se involucran adecuadamente en la tarea, buscando entre las opciones de respuesta disponibles en pos de maximizar sus recompensas.

#### **5.4.4. Registro electrofisiológico**

Los participantes fueron situados individualmente en una jaula de Faraday. Las señales de EEG fueron registradas en tiempo real usando un sistema GES300, de 129-canales con sensores HydroCel de Electrical Geodesic Inc., con un amplificador DC, un convertidor de 24-bit A/D, con una impedancia de input de 200 MΩ, un ruido de amplificado de 0.7 μV RMS/1.4 μV pp; y con el software NetStation™. Filtros análogos

fueron puestos entre 0.1 y 100 Hz. (−12 dB/octave roll-off). Un filtro de paso de banda digital, entre 0.5 and 30 Hz., fue luego aplicado para remover componentes de frecuencia indeseada. Las señales fueron muestreadas a 500 Hz. La referencia fue puesta por defecto en el vertex, pero luego fue re-referenciada de modo off-line al promedio de los electrodos. Dos derivaciones bipolares fueron designadas para monitorear movimientos oculares verticales y horizontales (EOG, por *electrooculograma*). Un EOG bipolar horizontal fue registrado desde el epicanto de cada ojo, y un EOG vertical fue registrado en las posiciones supra e infraorbital del ojo izquierdo.

Segmentos asociados a feedback (*feedback-locked epochs*) fueron seleccionados desde los datos continuos de EEG, empezando 200 ms. antes de la aparición del feedback. Todos los segmentos con contaminación por movimiento ocular fueron removidos para análisis posteriores, usando una remoción automática (Gratton, Coles & Donchin, 1983) e inspección visual. Segmentos libres de artefactos fueron promediados para obtener ERPs para cada uno de los 18 participantes (4 fueron excluidos por artefactos) en cada una de las ocho condiciones experimentales (AtBp<sub>Ganar</sub>, AtBp<sub>Perder</sub>, BtBp<sub>Ganar</sub>, BtBp<sub>Perder</sub>, AtAp<sub>Ganar</sub>, AtAp<sub>Perder</sub>, BtAp<sub>Ganar</sub>, BtAp<sub>Perder</sub>). Finalmente, los ERPs de los 18 participantes fueron promediados, para terminar con un ERP para cada condición experimental. El toolbox EEGLAB (Delorme & Makeig, 2004) de MATLAB fue usado para procesamientos y análisis posteriores.

#### **5.4.5. Procedimiento de Análisis de Datos**

##### ***Medidas comportamentales***

Tiempos de Reacción (TR) fueron calculados para cada sujeto sobre la base de sus tiempos respuestas en cada una de las cuatro categorías de juego. También la tendencia de los participantes a perseverar vs. cambiar su elección de botón tras ganar o perder fue

medida para cada categoría. Un análisis de varianza (ANOVA por *analysis of variance*) de medidas repetidas fue aplicado para explorar las tendencias de los resultados. Para los efectos significativos ( $p = 0 < 0.05$ ), se calcularon contrastes usando el test post-hoc de Tukey. Los resultados del cuestionario Likert, contestado tras el registro EEG, también fueron analizados de este modo.

### ***Potenciales relacionados a eventos***

Tras un análisis de efectos por *valencia* y *posición de electrodos* (ver ANEXO 1: “Resultados Complementarios”), dos sitios se asociaron a las mayores amplitudes y las mayores diferencias entre ganar y perder en el fERN. Consistentemente con reportes previos, estas posiciones coincidieron con los electrodos Fz y FCz (electrodo E11 de la línea medial frontal, y electrodo E6 en la posición fronto-central; Holroyd *et al.*, 2003; Miltner *et al.*, 1997; Yeung & Sanfey, 2004). Estos sitios fueron considerados para representar y analizar los componentes del ERP. Para el análisis estadístico de cada componente, los promedios fueron tomados de la ventana 180-230 ms. para el P200; 240-310 ms. para fERN y 365-440 ms. para una onda tipo-Positividad de Error.

Para cada componente, un ANOVA de medidas repetidas fue desarrollado, con los siguientes factores intra-sujetos: “*categoría*” (AtBp, BtBp, AtAp, BtAHP) y “*valencia*” (ganancia o pérdida, en referencia al feedback que refleja el resultado del trial). Simultáneamente, la “*probabilidad*” (Alta vs. Baja) y el “*tamaño*” de recompensa (Alto vs. Bajo) definido en las categorías, fueron considerados separadamente. A partir de esto, en general la presentación de resultados está organizada para dar cuenta primero de los efectos por *valencia* y *categoría*, y luego los efectos de *probabilidad* y *tamaño* de las recompensas ofrecidas. Los últimos dan cuenta de las diferencias entre los ERPs

asociados a categorías con altas y bajas *probabilidades* (AtAp más BtAp vs. AtBp más BtBp; o Ap vs. Bp) y *tamaños* de recompensa (AtAp más AtBp vs. BtAp más BtBp; o At vs. Bt). La posición de los *electrodos* (Fz y FCz) fue considerada en las dos comparaciones consideradas. El análisis de la sustracción entre ondas (*difference waves*) fue realizado cuando fue necesario. Los resultados fueron corregidos con los métodos de Greenhouse-Geisser y Bonferroni para ajustar outputs no-variados del ANOVA de medidas repetidas por violaciones del supuesto de uniformidad o simetría de compuesta. El método HSD de Tuckey fue usado para calcular contrastes post-hoc.

## 6. RESULTADOS

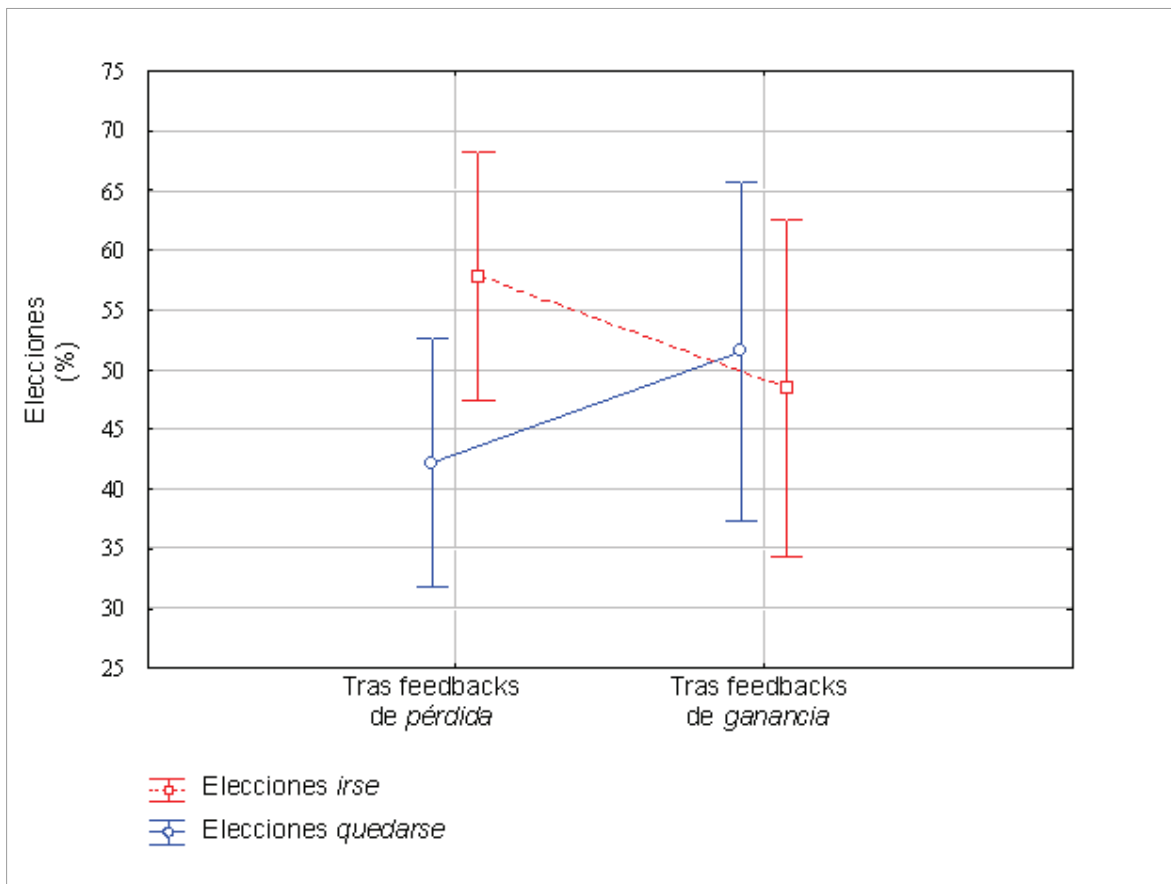
### 6.1. Resultados comportamentales

#### 6.1.1. Tarea experimental

##### 6.1.1a. Conducta de elección

En cada trial los sujetos tuvieron dos alternativas respecto del trial anterior: *quedarse* (seleccionar el mismo botón del último trial), o *irse* (probar con el botón alternativo). Se ha observado, en línea con la teoría del aprendizaje por reforzamiento, que los participantes tienden a cambiar su comportamiento tras perder, y a repetirlo tras ganar (Gehring & Willoughby, 2002; Hewig *et al.*, 2007). Se calculó la tendencia de cada sujeto a *quedarse* vs. *irse* tras ganar y tras perder, como la proporción de elecciones *quedarse* e *irse* respecto a todos los trials de ganancia y pérdida que cada uno jugó.

Un ANOVA de medidas repetidas a tres vías, sobre *categoría*, *valencia* y *elección*, reveló un efecto de la interacción entre *valencia* y *elección*,  $F(1, 21) = 11.809$ ,  $p < 0.005$ . En promedio, los sujetos cambian de botón tras un 57, 8% de los trials perdidos (SD = 2.51%), mientras que lo hicieron tras el 48,5% de los trials ganados (SD = 3.4 %). Un test post-hoc HSD de Tukey ( $M_s = 648.13$ ,  $df = 21$ ) sólo encontró diferencias entre *quedarse* ( $M = 42.22$  %,  $SD = 2.51$  %) e *irse* ( $M = 57.78$  %,  $SD = 2.51$  %) tras los juegos perdidos,  $p < 0.005$  (ver Figura 4).



**Figura 4:** Porcentaje de cada tipo de elección tras cada tipo de valencia de feedback. La diferencia entre elecciones *quedarse* e *irse* tras feedbacks de pérdida, es estadísticamente significativa,  $p < 0.005$ . Las barras verticales denotan intervalos de confianza al 0,95.

Un efecto de interacción también fue encontrado entre *categoría* y *elección*,  $F(3, 63) = 3.6061$ ,  $p < 0.05$ . El test post-hoc de Tukey ( $M_s = 90.039$ ,  $df = 63$ ) muestra que en las categorías con un 50% de *probabilidad* de ganar (*Ap*) se da la mayor tendencia a cambiar de botón, o la menor a quedarse en el botón del último trial. Así, el porcentaje de elecciones *irse* tras *AtAp* ( $M = 54.66\%$ ,  $SD = 2.82\%$ ) es significativamente mayor al de elecciones *quedarse* en la misma categoría ( $M = 45.34\%$ ,  $SD = 2.82\%$ ),  $p < 0.001$ , y que *quedarse* en *BtAp* ( $M = 45.10\%$ ,  $SD = 2.49\%$ ),  $p < 0.0005$ . El porcentaje de elecciones *irse* en *BtAp* ( $M = 54.9\%$ ,  $SD = 2.49\%$ ) también es significativamente mayor al de *quedarse* en la misma categoría,  $p < 0.0005$ , y en *AtAp*,  $p < 0.0005$ .

Los resultados anteriores sugieren lo que aquí se llamará *tendencia de evitación de*

*pérdida*, la tendencia a usar los feedbacks más para evitar repetir pérdidas, que para conseguir repetir ganancias. Los resultados sugieren que esta tendencia alcanza su máximo en las categorías Ap. Para confirmar esta hipótesis, se realizó un análisis de las diferencias observadas entre la proporción de asociación de feedbacks de pérdida a elecciones *irse*, y la asociación de de feedbacks de ganancia a elecciones *quedarse* (*perder & irse* menos *ganar & quedarse*). Este análisis representa la diferencia entre la eficacia de los refuerzos positivos para producir repetición de conducta, y la de los negativos para evitar dicha repetición. Se encontró un efecto de *categoría*  $F(3, 63) = 3.6061$ ,  $p < 0.05$ , sin embargo el test post-hoc de Tukey HSD ( $M_s = 90.04$ ,  $df = 63$ ) no encontró diferencias entre ningún par específico de categorías. De acuerdo a lo previamente mencionado, la ausencia de diferencias en el post-hoc podría deberse a que la *tendencia de evitación de pérdida* esté atenuada en las categorías Bp, At y Bt, respecto de las Ap. Para evaluar mejor esta posibilidad, se realizó el mismo análisis de diferencias (*perder & irse* menos *ganar & quedarse*), pero esta vez agrupando las categorías de acuerdo a sus equivalencias de *probabilidad* y *tamaño*. Los resultados mostraron que la tendencia observada es mayor en Ap ( $M = 9.55$ ,  $SD = 2.91$ ) que en Bp ( $M = 2.92$ ,  $SD = 5.68$ ),  $F(1, 21) = 8.2726$ ,  $p < 0.01$ , al tiempo que no muestran diferencias entre At ( $M = 6.24$ ,  $SD = 5.53$ ) y Bt ( $M = 6.23$ ,  $SD = 5.25$ ),  $F(1, 21) = 0.00007$ ,  $p = 0.99$ . De esto es posible concluir la existencia de una *tendencia de evitación de pérdida* en el uso de los feedbacks, máxima en las categorías Ap, mínima en las Bp, y no influida por el tamaño de las recompensas en juego.

### 6.1.1b. Tiempos de reacción

#### ***Efectos de categoría de juego***

Respecto a los TR, un ANOVA de medidas repetidas mostró diferencias significativas entre las *categorías* (AtAp [M = 583.17 ms., SD = 45.06]; AtBp [M = 614.19 ms., SD = 47.27]; BtAp [M = 579.73, SD = 44.62]; BtBp [M = 611.67 ms., SD = 44.06]),  $F(3, 63) = 12.269$ ,  $p < 0.000005$ . Un contraste post-hoc de Tukey ( $M_s = 597.78$ ,  $df = 63$ ) mostró que las categorías con un 25% de *probabilidad* de recompensa (Bp) se asociaron a mayores TRs que aquellas con un 50% de *probabilidad* (Ap) (ver Tabla 1).

#### ***Efectos de probabilidad y tamaño de recompensas***

Un ANOVA de medias repetidas a dos vías, sobre *tamaño* (At vs. Bt) y *probabilidad* (Ap vs. Bp), mostró que mientras el *tamaño* de las potenciales recompensas no se asocia a diferencias estadísticamente significativas en los TRs,  $F(1, 21) = 0.43907$ ,  $p = 0.51478$ , las categorías con baja *probabilidad* de recompensas (Bp), se asociaron a TRs significativamente mayores ( $M = 612.93$  ms.  $SD = 45.60$ ) que las categorías con alta *probabilidad* de recompensa (Ap, ( $M = 581.45$  ms.  $SD = 44.75$ );  $F(1, 21) = 21.079$ ,  $p < 0.0005$ .



Tabla 1

Resumen de efectos principales en los Tiempos de Reacción.

Efecto	valor-F	valor-p	Dirección
<i>Categoría</i>	12.269	< 0.000005	AtBp > AtAp*** AtBp > BtAp*** BtAp > AtAp** BtBp > BtAp***
<i>Probabilidad</i>	21.079	< 0.0005	Bp > Ap

**Nota:** La tabla muestra diferencias significativas en los *tiempos de reacción*, sus respectivos valores del ANOVA, la dirección de las diferencias y los contrastes post-hoc cuando corresponde. Las diferencias post-hoc son estadísticamente significativas al nivel \* $p < .05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ , \*\*\*\* $p < 0.0001$ .

### 6.1.2. Reportes de satisfacción (tarea posterior al experimento)

#### **Efectos de valencia de resultado y categorías de juego**

Como resulta predecible, la *valencia* del resultado genera diferencias significativas por sí misma en los reportes de satisfacción,  $F(1, 21) = 405.11$ ,  $p < 0.0000001$ , con una mayor satisfacción reportada para las *condiciones de ganancia* (Ganar [ $M = 4.58$ ,  $SD = 0.06$ ]; Perder [ $M = 1.86$ ,  $SD = 0.09$ ]). La interacción entre *categoría* y *valencia* también se mostró significativa,  $F(3, 63) = 12.915$ ,  $p < 0.00001$ . Respecto de lo último, un test post-hoc de Tukey ( $Ms = 0.30$ ,  $df = 63$ ) mostró diferencias entre cada *categoría* asociada a *ganancia* y cada *categoría* asociada a *pérdida*,  $p < 0.0005$ . Dentro de las *condiciones de ganancia*,  $BtBp_{Ganar}$  ( $M = 4.23$ ,  $SD = 0.11$ ) generó reportes de satisfacción significativamente menores que  $AtAp_{Ganar}$  ( $M = 4.82$ ,  $SD = 0.08$ ), y que  $AtBp_{Ganar}$  ( $M = 4.86$ ,  $SD = 0.08$ ). Dentro de las *condiciones de pérdida*,  $AtAp_{Perder}$  ( $M = 1.45$ ,  $SD = 0.13$ )

se asoció a reportes de satisfacción menores que  $BtBp_{Perder}$  ( $M = 2.14$ ,  $SD = 0.12$ ), y que  $BtAp_{Perder}$  ( $M = 1.82$ ,  $SD = 0.16$ ) (ver Tabla 2).

### **Efectos de probabilidad y tamaño de recompensas**

El único efecto significativo se encontró en la interacción entre *valencia* y *tamaño*,  $F(1, 21) = 29.938$ ,  $p < 0.00005$ . Un test post-hoc de Tukey ( $Ms = 0.35$ ,  $df = 21$ ) mostró diferencias entre todas las combinaciones de *valencia* x *tamaño*, de modo que a mayor *tamaño* de la posible recompensa, mayor la satisfacción tras ganar, y menor tras perder (ver Tabla 2).

Tabla 2

Resumen de efectos principales en los Reportes de Satisfacción

<b>Efecto</b>	valor-F	valor-p	Dirección
<i>Valencia</i>	405.11	< 0.0000001	Ganar > Perder
<i>Categoría x Valencia</i>	12.915	< 0.00001	$AtAp_{Ganar} > BtBp_{Ganar}^*$ $AtBp_{Ganar} > BtBp_{Ganar}^{**}$ $BtAp_{Perder} > AtAp_{Perder}^*$ $BtBp_{Perder} > AtAp_{Perder}^{**}$
<i>Tamaño x Valencia</i>	29.938	< 0.00005	$At_{Ganar} > Bt_{Ganar}^{**}$ $Bt_{Ganar} > Bt_{Perder}^{***}$ $Bt_{Perder} > At_{Perder}^{**}$

**Nota:** La tabla muestra diferencias significativas en los *reportes de satisfacción*, sus respectivos valores del ANOVA, la dirección de las diferencias y los contrastes post-hoc cuando corresponde. Las diferencias post-hoc son estadísticamente significativas al nivel  $*p < .05$ ,  $**p < 0.01$ ,  $***p < 0.001$ ,  $****p < 0.0001$ .

## 6.2. Potenciales relacionados a eventos

Un ANOVA de medidas repetidas de dos vías, sobre *valencia* (Ganar vs. Perder) y *electrodo* 19 posiciones de electrodos en el sistema 10 - 20) reveló un efecto significativo de *valencia*, y una interacción significativa de *valencia* x *electrodo* (ver ANEXO 1: “Resultados Complementarios”). A partir de esta interacción, los análisis consecutivos fueron desarrollados sobre FCz y Fz, sitios dónde el fERN tiene sus máximos valores. En estos electrodos se aprecian las mayores ondas de diferencia (*Perder* menos *Ganar*), al tiempo de ser los principales sitios utilizados para reportar fERN en estudios previos (Holroyd *et al.*, 2003; Miltner *et al.*, 1997; Yeung & Sanfey, 2004).

### 6.2.1. P200

Dado que un análisis visual permite observar diferencias entre las ondas asociadas a *Ganar* y *Perder* en una ventana temporal previa al fERN (ver Figura 5), y dado que este componente ha sido asociado a modulación por saliencia y captura atencional (Guillem, Bicu & Debruille, 2001; Kenemans, Kok & Smulders, 1993; Potts, Liotti, Tucker & Posner, 1996; Potts, 2004; Potts *et al.*, 2006), se decidió incorporar un análisis estadístico de esta ventana temprana (P200).

### ***Efectos de valencia de resultado y categorías de juego***

Un ANOVA de medidas repetidas a tres vías, sobre *valencia* (Ganar vs. Perder), *categoría* (AtAp, AtBp, BtAp, BtBp) y *electrodo* (FCz vs. Fz), reveló un efecto significativo de *valencia*,  $F(1, 16) = 38.836$ ,  $p < 0.00005$ , *categoría*,  $F(3, 48) = 6.0107$ ,  $p < 0.005$ , y *electrodo*,  $F(1, 16) = 6.7879$ ,  $p < 0.05$ . La única interacción cercana a la significatividad estadística fue *categoría* x *electrodo*,  $F(3, 48) = 2.7330$ ,  $p = 0.05391$ . La amplitud fue menos positiva para pérdidas ( $M = 4.06 \mu V$ ,  $SD = 0.67$ ) que para ganancias ( $M = 6.25 \mu V$ ,

SD = 0.85) (ver Figura 5). Respecto a las diferencias entre *categorías*, un test post-hoc de Tukey (Ms = 6.19, df = 48) mostró a AtAp (M = 6.07  $\mu$ V, SD = 0.76) asociada a mayores positividades que AtBp (M = 4.82  $\mu$ V, SD = 0.94), y que BtBp (M = 4.36  $\mu$ V, SD = 0.76). La categoría BtAp (M = 5.36  $\mu$ V, SD = 0.68) no difirió del resto de las categorías en el análisis. Estos resultados muestran una discriminación temprana no sólo según la *valencia* del resultado, sino también una diferenciación de la categoría más saliente (AtAp, con mayor tamaño y mayor probabilidad de recompensa), con independencia de la *valencia*.

### ***Efectos de probabilidad y tamaño de recompensas***

Colapsando las categorías de juego de acuerdo a sus distribuciones de *probabilidad* y al *tamaño* de las recompensas que ofrecen, fue posible evaluar el efecto de estas variables sobre la amplitud del P200. Un ANOVA de medidas repetidas a cuatro vías, sobre *valencia* del feedback, *electrodo*, *probabilidad* (Ap, Bp) y *tamaño* (At, Bt), mostró que las categorías Ap (M = 5.72  $\mu$ V, SD = 0.70) se asociaron a amplitudes mayores que las Bp (M = 4.59  $\mu$ V, SD = 0.84),  $F(1, 16)=7.7686$ ,  $p < 0.05$ ; al tiempo que las categorías At (M = 5.45  $\mu$ V, SD = 0.82), a amplitudes mayores que las Bt (M = 4.86  $\mu$ V, SD = 0.67),  $F(1, 16)=8.4907$ ,  $p < 0.05$ . Dada la posible superposición del P200 respecto del fERN, un análisis *peak to peak* fue desarrollado para estos componentes (ver ANEXO 1: “Resultados Complementarios”). Los resultados de este análisis sugieren la presencia de una modulación temprana por *categoría* de juego, en la misma dirección del fERN, pero efecto de interacción *valencia x categoría* sólo en la ventana del fERN.

Tabla 3

Resumen de efectos principales en la ventana temporal 180-230 ms. (P200).

<b>Efecto</b>	valor-F	valor-p	Dirección
<i>Valencia</i>	38.836	< 0.00005	Ganar > Perder
<i>Categoría</i>	6.0107	< 0.005	AtAp > AtBp* AtAp > BtBp**
<i>Electrodo</i>	6.7879	< 0.05	FCz > Fz
<i>Probabilidad</i>	7.7686	< 0.05	Ap > Bp
<i>Tamaño</i>	8.4907	< 0.05	At > Bt

**Nota:** La tabla muestra diferencias significativas en el P200, sus respectivos valores del ANOVA, la dirección de las diferencias y los contrastes post-hoc cuando corresponde. Las diferencias post-hoc son estadísticamente significativas al nivel \*p<.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001, \*\*\*\*p<0.0001.

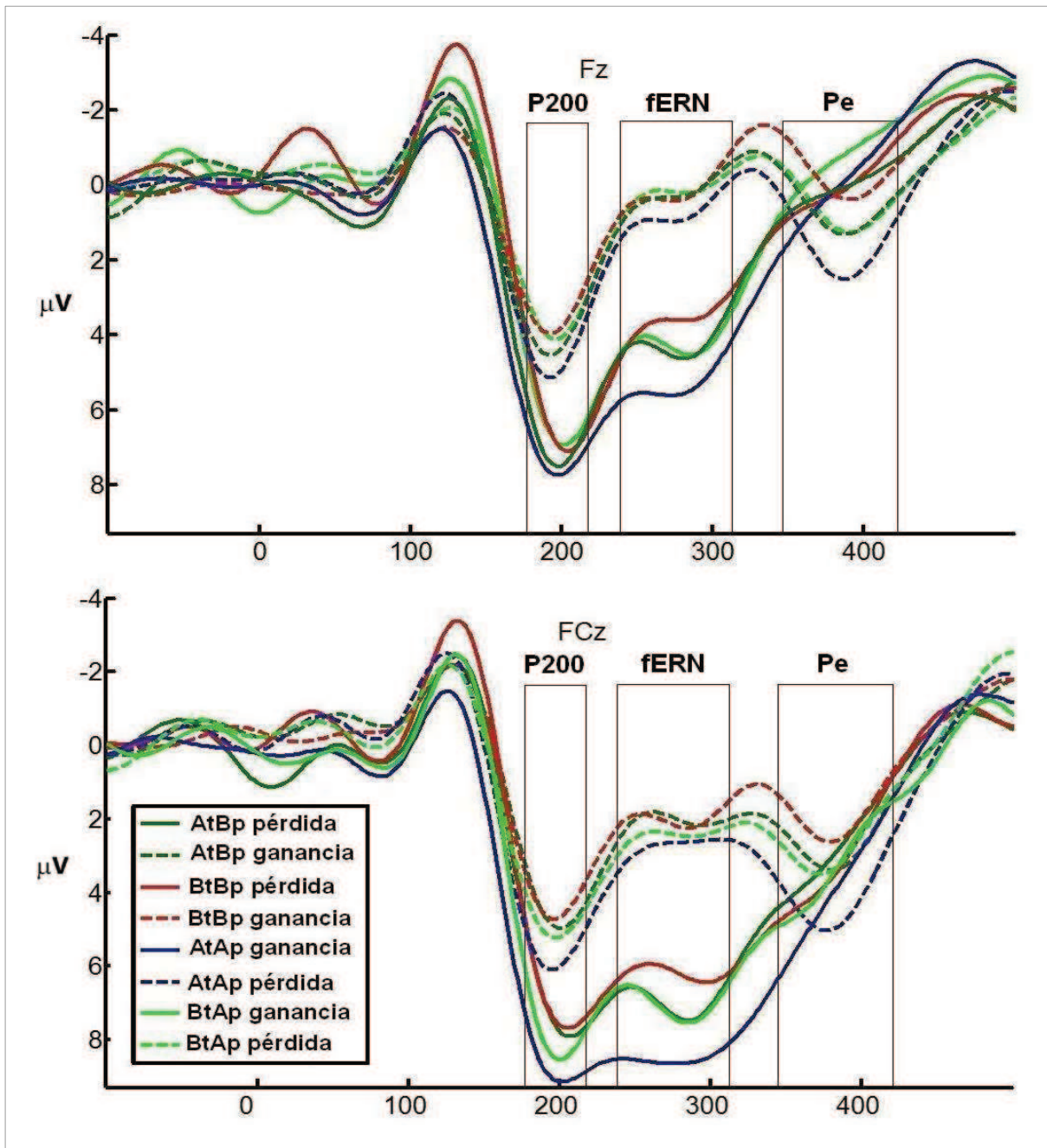
### 6.2.2. Feedback Error-Related Negativity (fERN)

#### ***Efectos de valencia de resultado y categorías de juego***

Un ANOVA de medidas repetidas a tres vías, sobre *electrodo* (Fz vs. FCz), *valencia* (Ganar vs. Perder) y *categoría* (AtAp, AtBp, BtAp, BtBp) reveló un efecto significativo de *electrodo*,  $F(1, 16)=11.713$ ,  $p < 0.005$ , *categoría*,  $F(3, 48)=12.411$ ,  $p < 0.00001$ , y *valencia*,  $F(1, 16)=70.895$ ,  $p < 0.00001$ . La amplitud fue más negativa (en este caso *menos positiva*) para *pérdidas* ( $M = 1.31 \mu V$ ,  $SD = 0.47$ ) que para *ganancias* ( $M = 5.53 \mu V$ ,  $SD = 0.47$ ). Respecto del efecto de las *categorías*, un test post-hoc de Tukey ( $M_s = 2.92$ ,  $df = 48$ ) reveló una mayor positividad en AtAp ( $M = 4.44 \mu V$ ,  $SD = 0.38$ ) en comparación a BtAp ( $M = 3.28 \mu V$ ,  $SD = 0.44$ ), AtBp ( $M = 3.26 \mu V$ ,  $SD = 0.50$ ) y BtBp ( $M = 2.70 \mu V$ ,  $SD = 0.42$ ). De este modo se observó que, con independencia de la *valencia* del resultado, la

amplitud del fERN distingue entre las categorías con *Alta* y *Baja probabilidad* de recompensa, así como entre *Altos* y *Bajos tamaños* en las recompensas ofrecidas.

Un efecto de interacción se observó entre *valencia* y *categoría*,  $F(3, 48) = 2,8583$ ,  $p < 0.05$ . El respectivo test post-hoc de Tukey ( $M_s = 4.96$ ,  $df = 48$ ) encontró diferencias significativas entre las *condiciones de ganancia*, donde  $AtAp_{Ganar}$  ( $M = 7.09 \mu V$ ,  $SD = 0.47$ ) se asoció a las mayores positividadades en comparación a  $BtAp_{Ganar}$  ( $M = 5.37 \mu V$ ,  $SD = 0.53$ ), y en comparación a  $BtBp_{Ganar}$  ( $M = 4.23 \mu V$ ,  $SD = 0.57$ ) (ver Tabla 4). La diferencia entre  $AtAp_{Ganar}$  y  $AtBp_{Ganar}$  ( $M = 5.42 \mu V$ ,  $SD = 0.67$ ) bordeó la significación estadística,  $p = 0.06$ . No se encontraron diferencias entre las *condiciones de pérdida* (ver Figura 5).



**Figura 5:** Efectos de *categoría x valencia*. ERPs en Fz y FCz mostrando los efectos en P200, fERN y Pe. Los cuadros dentro de la figura indican la ventana temporal correspondiente a cada uno de estos componentes.

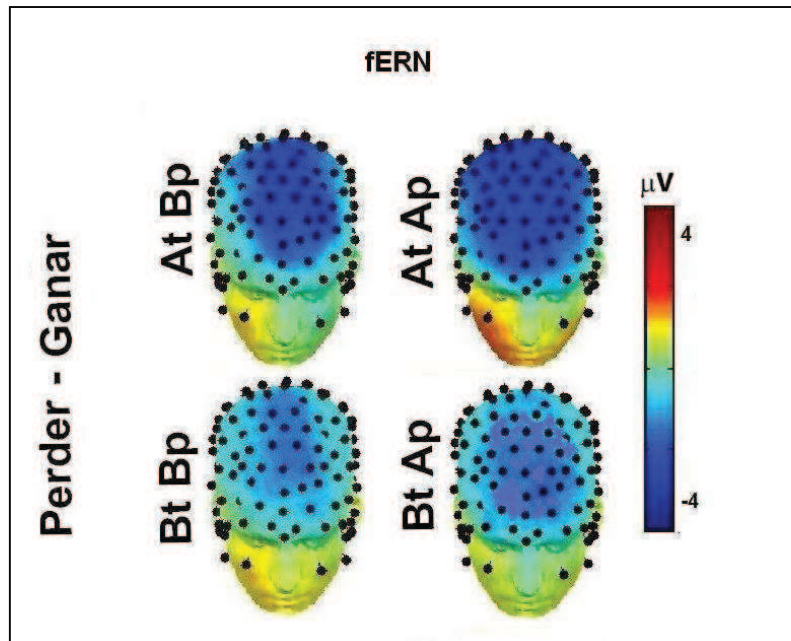
Para examinar mejor la interacción *valencia x categoría*, se evaluó al fERN en el canal FCz, dónde éste se muestra mayor, en línea con estudios previos que muestran

este tipo de efectos (Gehring *et al.*, 1993; Hewig *et al.*, 2007; Holroyd *et al.*, 2003; Holroyd, Larsen *et al.*, 2004; Holroyd *et al.*, 2008; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004; Yeung & Sanfey, 2004). En este electrodo no se observaron diferencias significativas entre las *condiciones de pérdida*,  $F(3, 48)=1.2927$ ,  $p = 0.28767$ ; mientras que si se observaron entre las *condiciones de ganancia*,  $F(3, 48) = 9.8995$ ,  $p < 0.001$ . Un test post-hoc de Tukey ( $M_s = 2.94$ ,  $df = 48$ ) mostró a  $BtBp_{Ganar}$  ( $M = 4.51 \mu V$ ,  $SD = 0.68$ ) distinguiéndose del resto de las *condiciones de ganancia*, generando las menores positividadades.  $AtAp_{Ganar}$  genera las mayores positividadades ( $M = 7.72 \mu V$ ,  $SD = 0.53$ ), y mientras sólo bordea una diferencia significativa con  $AtBp_{Ganar}$  ( $M = 6.19 \mu V$ ,  $SD = 0.68$ ),  $p = 0.06$ , si se diferencia en estos términos de  $BtAp_{Ganar}$  ( $M = 6.08 \mu V$ ,  $SD = 0.63$ ) (ver Tabla 4). De forma interesante, las dos categorías que tienen valores esperados equivalentes,  $AtBp$  y  $BtAp$ , no se asociaron a diferencias respecto de la amplitud del fERN relacionado a feedbacks de ganancia,  $p = 0.998$ .

Estos resultados sugieren que, en este experimento, sólo los fERNs asociados a feedbacks de ganancia discriminan de acuerdo a la combinación de *tamaño* y *probabilidad* de recompensas presentes en las categorías de juegos. Más aun, se puede observar que a mayor VE, mayor positividad (menor negatividad) en el fERN asociado a feedback de ganancia. Cuando los participantes pierden, no se aprecian estos efectos.

Para analizar mejor el efecto del resultado del juego (*valencia*) en las amplitudes observadas para cada *categoría* de juego, ondas de diferencia (*Perder* menos *Ganar*) fueron generadas, teniendo en cuenta FCz y Fz para cada sujeto antes de promediar. A pesar de que las diferencias se organizan de mayor a menor del modo esperado, y en línea con los resultados ya reportados ( $AtAp$  [ $M = -4.75 \mu V$ ,  $SD = 0.74$ ] >  $AtBp$  [ $M = -4.61 \mu V$ ,  $SD = 0.86$ ] >  $BtAp$  [ $M = -4.27 \mu V$ ,  $SD = 0.61$ ] >  $BtBp$  [ $M = -2.90 \mu V$ ,  $SD = 0.68$ ]), las diferencias no alcanzaron a ser significativas,  $F(3, 48) = 2.5290$ ,  $p = 0.06830$  (ver Fig. 5).



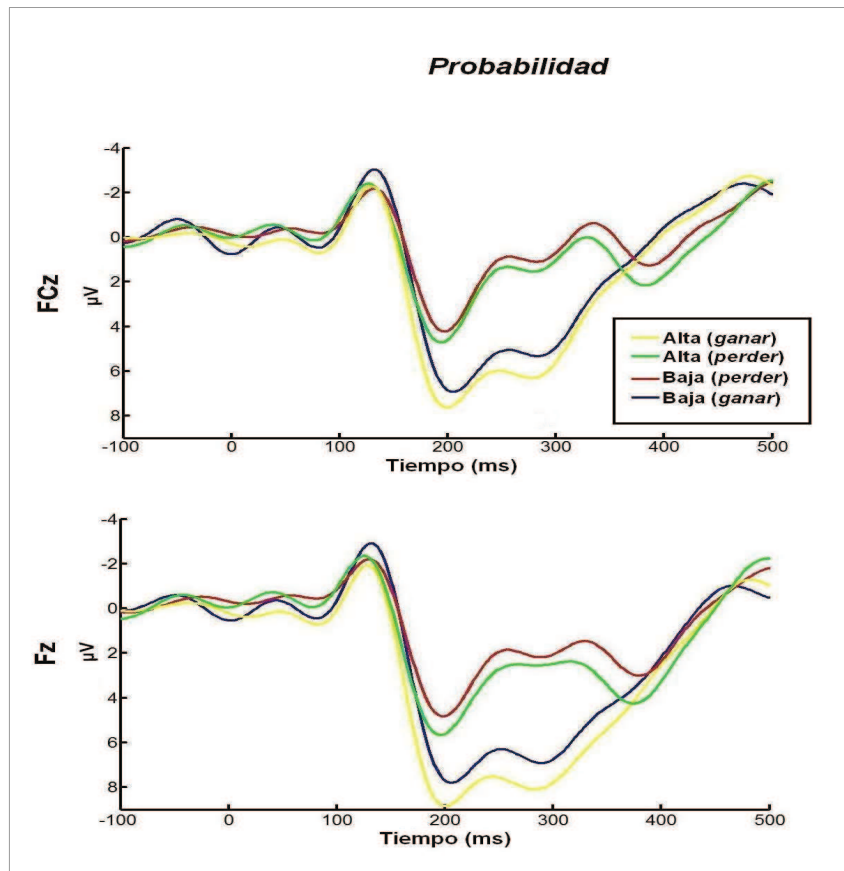


**Figura 6:** Mapa de voltaje para cada categoría de juegos en la sustracción Perder – Ganar en fERN. Las diferencias no alcanzan a ser significativas.

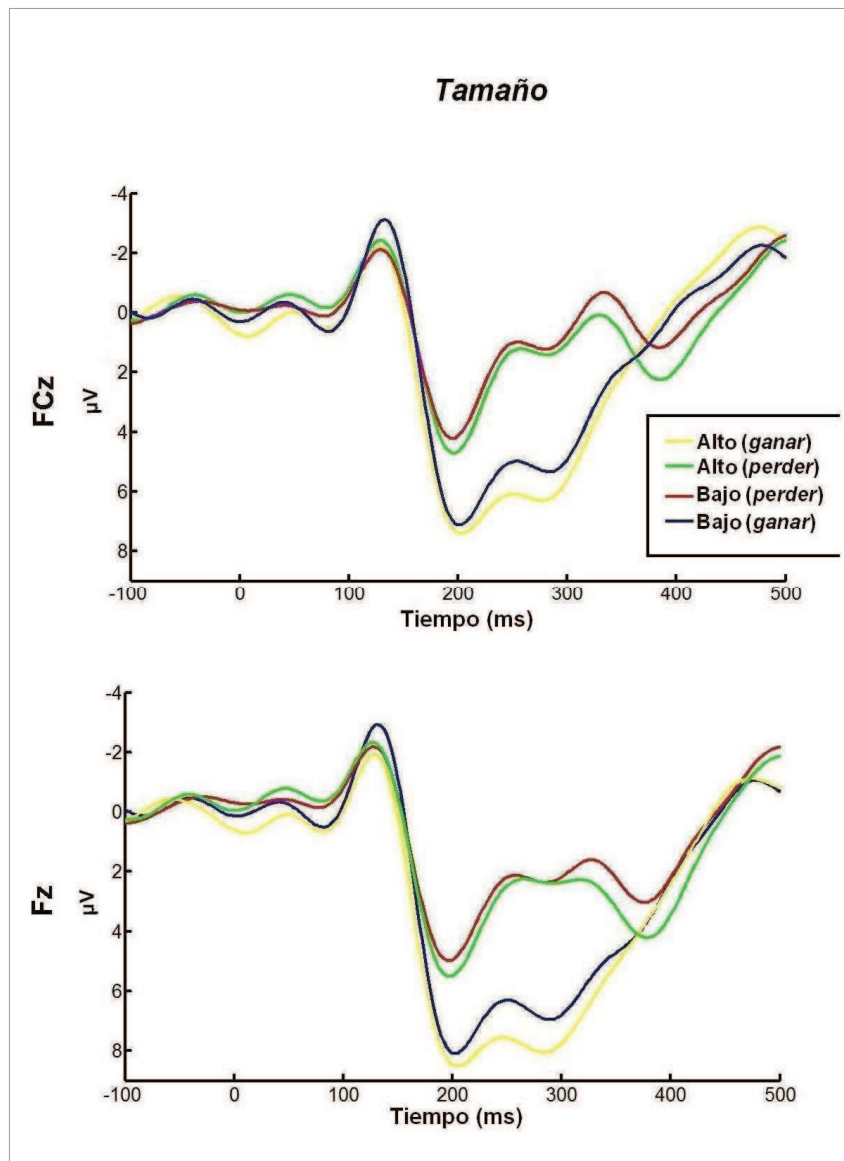
### ***Efectos de probabilidad y tamaño de recompensas***

Colapsando las condiciones de acuerdo a la *probabilidad* y al *tamaño* de las recompensas ofrecidas, fue posible evaluar el efecto de estas variables sobre la amplitud del fERN. Un ANOVA de medidas repetidas a cuatro vías, sobre *valencia* del feedback (Ganar vs. Perder), *electrodo* (FCz, Fz), *probabilidad* (Ap, Bp) y *tamaño* de las recompensas (At, Bt), reveló un efecto significativo de *probabilidad* (Bp [M = 2.98 µV, SD = 0.46] > Ap [M = 3.86 µV, SD = 0.36]),  $F(1, 16) = 10.702$ ,  $p < 0.005$ , y *tamaño*, (Bt [M = 2.99 µV, SD = 0.40] > At [M = 3.85 µV, SD = 0.42]),  $F(1, 16) = 23.405$ ,  $p < 0.0005$ . La interacción entre *valencia* y *tamaño* no fue significativa,  $F(1, 16) = 2.5919$ ,  $p = 0.12696$ , y la interacción entre *valencia* y *probabilidad* sólo bordeó la significatividad,  $F(1, 16) = 4.3796$ ,  $p = 0.054$ . Un ANOVA de medidas repetidas sobre *probabilidad* dentro de las *condiciones de ganancia* mostró una diferencia significativa (Ap<sub>Ganar</sub> [M = 6.90 µV, SD = 0.50]; Bp<sub>Ganar</sub> [M = 5.35 µV, SD = 0.63]),  $F(2, 15) = 6,5860$ ,  $p < 0.01$  (ver Figura 7). Un

análisis equivalente, esta vez respecto del *tamaño* de las recompensas, también mostró diferencias significativas ( $At_{Ganar}$  [ $M = 6.95 \mu V$ ,  $SD = 0.58$ ];  $Bt_{Ganar}$  [ $M = 5.30 \mu V$ ,  $SD = 0.58$ ]),  $F(2, 15) = 5.3592$ ,  $p < 0.05$  (ver Figura 8). Según estos resultados sólo las *condiciones de ganancia* son internamente discriminadas según el *tamaño* y la *probabilidad* de las recompensas.



**Figura 7:** Efectos de *probabilidad x valencia*. ERPs en Fz y FCz mostrando los efectos según *probabilidad* de recompensa (Alta vs. Baja) y *valencia* de los feedbacks (Ganar vs. Perder).



**Figura 8:** Efectos de *valencia x tamaño*. ERPs en Fz y FCz mostrando los efectos según *tamaño* de recompensa ofrecidas (Alta vs. Baja) y *valencia* de los feedbacks (Ganar vs. Perder).

Tabla 4

Resumen de efectos principales en la ventana 240-310 ms. (fERN).

<b>Efecto</b>	valor-F	valor-p	Dirección
<i>Electrodo</i>	11.713	< 0.005	FCz > Fz
<i>Valencia</i>	70.895	< 0.00001	Perder > Ganar
<i>Categoría</i>	12.411	< 0.00001	AtBp > AtAp** BtAp > AtAp** BtBp > AtAp***
<i>Categoría x Valencia</i>	2,8583	< 0.05	BtBp <sub>Ganar</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> *** BtAp <sub>Ganar</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> **
<i>Categoría x Valencia (en FCz)</i>	9.8995	< 0.001	BtBp <sub>Ganar</sub> > AtBp <sub>Ganar</sub> *** BtBp <sub>Ganar</sub> > BtAp <sub>Ganar</sub> ** BtBp <sub>Ganar</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> *** BtAp <sub>Ganar</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> **
<i>Probabilidad</i>	10.702	< 0.005	Bp > Ap
<i>Tamaño</i>	23.405	< 0.0005	Bt > At
<i>Probabilidad (ganancias)</i>	6,5860	< 0.01	Bp <sub>Ganar</sub> > Ap <sub>Ganar</sub>
<i>Tamaño (ganancias)</i>	5.3592	< 0.05	Bt <sub>Ganar</sub> > At <sub>Ganar</sub>

**Nota:** La tabla muestra diferencias significativas en el fERN, sus respectivos valores del ANOVA, la dirección de las diferencias y los contrastes post-hoc cuando corresponde. Las diferencias post-hoc son estadísticamente significativas al nivel \*p<.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001, \*\*\*\*p<0.0001.

### 6.2.3. Positividad de Error (Pe)

Un tercer peak resulta observable en torno a los 300-400 ms. que siguen a la presentación del feedback, especialmente en las *condiciones de pérdida* (ver Figura 5). Dado que varios estudios de ERN de respuesta han reportado una positividad asociada al error (Pe) (Boksem, Tops, Kostermans & De Cremer, 2008; Nieuwenhuis *et al.*, 2001; O'Connell, Dockree, Bellgrove, Kelly, Hester, Garavan, Robertson & Foxe, 2007; Shalgi, Barkan & Deouell, 2009), se analizó la amplitud de la positividad observada.

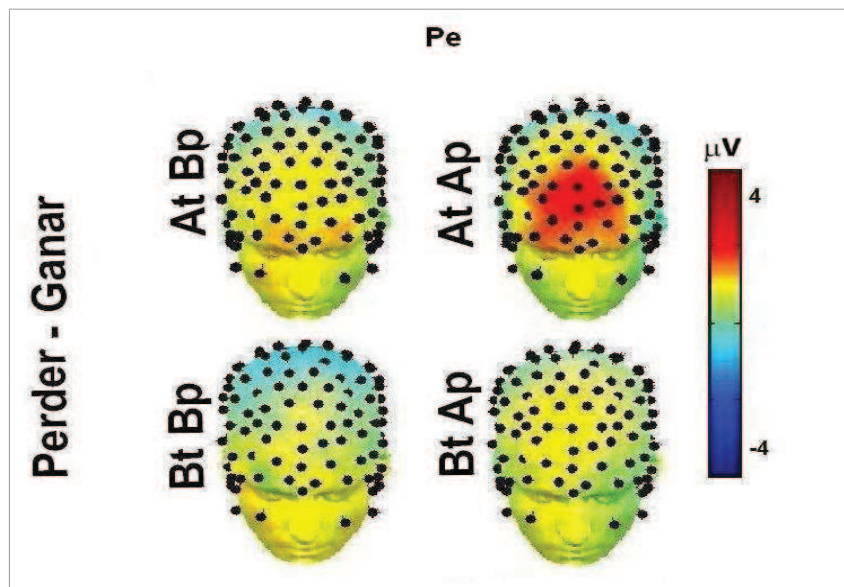
#### ***Efectos de valencia de resultado y categorías de juego***

Un ANOVA de medidas repetidas a tres vías, sobre *electrodo* (Fz vs. FCz), *valencia* (Ganar vs. Perder) y *categoría* (AtAp, AtBp, BtAp, BtBp) reveló un efecto significativo de *electrodo*,  $F(1, 16)=60,703$ ,  $p < 0.000001$ , y *categoría*,  $F(3, 48) = 7,6540$ ,  $p < 0.0005$ . También se encontró una interacción entre *electrodo* y *valencia*,  $F(1, 16) = 14,823$ ,  $p < 0.005$ . Tanto las *condiciones de pérdida* como las *condiciones de ganancia* fueron más negativas, y se diferenciaron en mayor medida entre ellas en Fz (Ganar [M =  $-0.10 \mu\text{V}$ , SD = 0.92]; Perder [M =  $1.30 \mu\text{V}$ , SD = 0.65]) que en FCz (Ganar [M =  $2.76 \mu\text{V}$ , SD = 0.85]; Perder [M =  $2.82 \mu\text{V}$ , SD = 0.72]) (ver Figura 5). Un contraste post-hoc de Tukey (Ms = 2.11, df = 16) mostró que en Fz, los feedbacks de pérdida se asociaron a una mayor positividad que los feedbacks de ganancia (ver Tabla 5).

Un efecto de interacción entre *categoría* y *valencia* también resultó significativo,  $F(3, 48)=6.7277$ ,  $p < 0.001$ . De acuerdo al test post-hoc de Tukey (Ms = 3.64, df = 48), la única condición experimental que se diferenció de las otras fue AtAp<sub>Perder</sub>, con las mayores positivities (ver Figura 5 y Tabla 5). En conjunto, estos resultados muestran una onda tipo-Pe discriminando entre condiciones de ganancia y de pérdida en un área anterior a la del fERN. Las pérdidas generan mayores positivities que las ganancias, al tiempo que

la condición  $AtAp_{Perder}$  genera positividades significativamente mayores que el resto de las condiciones experimentales.

Para analizar con mayor detalle el efecto de la *valencia* del resultado sobre las amplitudes del Pe en cada *categoría* de juego, se generaron ondas de diferencia (Perder menos Ganar). Se encontraron diferencias significativas,  $F(3, 48)=7.1120$ ,  $p < 0.0005$ , donde  $AtAp$  es la *categoría* asociada a la mayor diferencia ( $M = 2.58 \mu V$ ,  $SD = 0.66$ ), seguida por  $AtBp$  ( $M = 2.06 \mu V$ ,  $SD = 0.50$ ),  $BtAp$  ( $M = 0.73 \mu V$ ,  $SD = 0.64$ ) y  $BtBp$  ( $M = -0.62 \mu V$ ,  $SD = 0.61$ ). Un test post-hoc de Tukey ( $Mse = 8.21$ ,  $df = 48$ ) mostró como significativa la diferencia entre las categoría con mayor ( $AtAp$ ) y menor ( $BtBp$ ) valor esperado,  $p < 0.001$  (ver Figura 9).



**Figura 9:** Mapa de voltaje para cada *categoría* de juegos en la sustracción Perder – Ganar en Pe. Las diferencias entre  $AtAp$  y  $BtBp$  son significativas.

### ***Efectos de probabilidad y tamaño de recompensas***

Colapsando las categorías de acuerdo a su distribución de *probabilidades* y al

*tamaño* de las recompensas ofrecidas, fue posible evaluar el efecto de estas variables sobre la amplitud de la onda tipo-Pe. Un ANOVA de medidas repetidas a cuatro vías, sobre *valencia* del feedback (Ganar vs. Perder), posición de *electrodo* (FCz, Fz), *probabilidad* (Ap, Bp) y *tamaño* de las recompensas (At, Bt), reveló un efecto significativo de *probabilidad*,  $F(1, 16)=7.3238$ ,  $p < 0.05$ , y *tamaño*,  $F(1, 16) = 7,7875$ ,  $p < 0.05$ . Las interacciones entre *valencia* y *tamaño*,  $F(1, 16)=7.8567$ ,  $p < 0.05$ , y entre *valencia* y *probabilidad*,  $F(1, 16)=6.4725$ ,  $p < 0.05$ , resultaron significativas. Un test post-hoc de Tukey ( $M_s = 6.22$ ,  $df = 16$ ) para la interacción entre *valencia* y *tamaño* mostró que  $At_{Perder}$  ( $M = 2.86 \mu V$ ,  $SD = 0.69$ ) se asoció a mayores positividads que  $Bt_{Perder}$  ( $M = 1.25 \mu V$ ,  $SD = 0.70$ ),  $At_{Ganar}$  ( $M = 1.29 \mu V$ ,  $SD = 0.91$ ) y  $Bt_{Ganar}$  ( $M = 1.37 \mu V$ ,  $SD = 0.87$ ) (ver Figura 8). Estos resultados sugieren que perder en el contexto de mayores ganancias potenciales, genera mayores amplitudes del Pe, que pérdidas equivalentes en el contexto de menores ganancias potenciales, y mayores amplitudes que ganar independientemente del tamaño de la ganancia.

Respecto de la interacción entre *valencia* y *probabilidad*, un test post-hoc de Tukey ( $M_s = 5.02$ ,  $df = 16$ ) mostró que  $Ap_{Perder}$  ( $M = 2.90 \mu V$ ,  $SD = 0.63$ ) se asoció a mayores amplitudes que  $Bp_{Perder}$  ( $M = 1.21 \mu V$ ,  $SD = 0.80$ ),  $p < 0.005$ ,  $Ap_{Ganar}$  ( $M = 1.48 \mu V$ ,  $SD = 0.83$ ),  $p < 0.01$ , y  $Bp_{Ganar}$  ( $M = 1.18 \mu V$ ,  $SD = 0.94$ ),  $p < 0.005$  (ver Figura 7). Este análisis sugiere que perder en el contexto de una alta *probabilidad* de ganar, genera mayores amplitudes en el Pe, que perder en el contexto de bajas *probabilidades* de ganar, y que ganar en ambos niveles de *probabilidad*.

Tabla 5

Resumen de efectos principales en la ventana temporal 365-400 ms. (onda tipo-Pe).

Efecto	valor-F	valor-p	Dirección
<i>Electrodo x valencia</i>	14,823	< 0.005	FZ <sub>Perder</sub> > FZ <sub>Ganar</sub> ***
<i>Categoría x valencia</i>	6.7277	< 0.001	AtAp <sub>Perder</sub> > BtAp <sub>Perder</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > AtBp <sub>Perder</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > BtBp <sub>Perder</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > AtAp <sub>Ganar</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > BtAp <sub>Ganar</sub> *** AtAp <sub>Perder</sub> > AtBp <sub>Ganar</sub> ***
<i>Categoría x Valencia (Ondas por diferencia)</i>	7.1120	< 0.0005	AtAp > BtBp***
<i>Tamaño x Valencia</i>	7.8567	< 0.05	At <sub>Perder</sub> > Bt <sub>Perder</sub> ** At <sub>Perder</sub> > At <sub>Ganar</sub> ** At <sub>Perder</sub> > Bt <sub>Ganar</sub> *
<i>Probabilidad x Valencia</i>	8.9087	< 0.01	Ap <sub>Perder</sub> > Bp <sub>Perder</sub> ** Ap <sub>Perder</sub> > Ap <sub>Ganar</sub> ** Ap <sub>Perder</sub> > Bp <sub>Ganar</sub> **

**Nota:** La tabla muestra diferencias significativas en la onda tipo-Pe, sus respectivos valores del ANOVA, la dirección de las diferencias y los contrastes post-hoc cuando corresponde. Las diferencias post-hoc son estadísticamente significativas al nivel \*p<.05, \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001, \*\*\*\*p<0.0001.



## 7. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

**H<sub>1</sub>:** La amplitud del *feedback error-related negativity* que sigue a trials ganados se distinguirá significativamente de la del *feedback error-related negativity* que sigue a trials perdidos.

H<sub>01</sub>: La amplitud del *feedback error-related negativity* que sigue a trials ganados no se distinguirá significativamente de la del *feedback error-related negativity* que sigue a trials perdidos.

**Resultado:** Se confirma H<sub>1</sub>.

**H<sub>2</sub>:** Dentro de los trials perdidos, la amplitud del *feedback error-related negativity* será mayor mientras mayor sea la probabilidad de ganar, y mayor la recompensa no conseguida.

H<sub>02</sub>: Dentro de los trials perdidos la amplitud del *feedback error-related negativity* no distinguirá entre tamaños de recompensas ofrecidas, ni entre distribuciones de probabilidad entre posibles resultados

HA<sub>2</sub>: Dentro de los trials perdidos la amplitud del *feedback error-related negativity* no discriminará o según tamaños, o según probabilidad de recompensas ofrecidas; o alguna de las diferencias se dará en una dirección distinta a la planteada en H2.

**Resultado:** Se confirma H<sub>02</sub>.

**H<sub>3</sub>:** Dentro de los trials ganados, la amplitud del *feedback error-related negativity* será menor (menos negativa o más positiva) mientras menor sea la probabilidad de ganar, y mayor la recompensa conseguida.

H<sub>03</sub>: Dentro de los trials ganados la amplitud del *feedback error-related negativity* no distinguirá entre tamaños de recompensas ofrecidas, ni entre distribuciones de probabilidad entre posibles resultados

HA<sub>3</sub>: Dentro de los trials ganados la amplitud del *feedback error-related negativity* no discriminará o según tamaños, o según probabilidad de recompensas ofrecidas; o alguna de las diferencias se dará en una dirección distinta a la planteada en H3.

**Resultado:** Se confirma HA<sub>3</sub>. Una de las diferencias se dio en una dirección distinta a la planteada en H3. La amplitud del fERN es menor (menos negativa o más positiva) mientras mayor es la probabilidad de ganar, y mayor la recompensa conseguida.

## 8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el presente estudio se comparó el efecto de *probabilidad* y *tamaño* de las recompensas sobre la amplitud del fERN, siendo *probabilidad* y *tamaño* los principales factores tras la noción de *resultado esperado* en la investigación sobre el fERN. La interacción entre estos dos factores, por su parte, configura la idea de *valor esperado*, asociado a la idea de expectativas racionales. Se encontró que pérdidas de montos equivalentes, no generan diferencias significativas en la amplitud del fERN, a pesar de estar precedidas por diferentes *probabilidades* y/o por diferentes *tamaños* de las recompensas ofrecidas. En contraste, se encontró una positividad en la ventana temporal del fERN. A mayor *probabilidad* antecedendo a las recompensas positivas, y a mayor *tamaño* de dichas recompensas, mayor la amplitud de la onda positiva. De este modo, mientras mayor es el *valor esperado* de las categorías de juego, como resultado de la interacción entre *probabilidad* y *tamaño*, mayor la positividad que sigue a feedbacks de ganancia. Este hallazgo apoya la idea de que tanto el *tamaño* como la *probabilidad* de las recompensas, junto a su interacción en términos de *valor esperado*, modula el valor motivacional de los feedbacks de ganancia.

La Figura 10 presenta los principales resultados comportamentales, tanto respecto de medidas durante los registros EEG (conductas de elección y tiempos de reacción) como tras los registros (cuestionario de satisfacción). Respecto de las últimas, como resultaba esperable, 1) los feedbacks de ganancia se asocian a reportes de mayor satisfacción que los feedbacks de pérdida; 2) ganar juegos altamente recompensados (\$400 o "At) genera reportes de mayor satisfacción que ganar juegos con menor recompensa en juego (\$150 o "Bt"); 3) perder los juegos con las mayores recompensas ofrecidas, se asocia a los menores índices de satisfacción.

También resultaba esperable que ganar en juegos asociados a menores *probabilidades* de ganar (25% o “Bp”) generaría mayores reportes de satisfacción, que ganar en aquellos con mayores probabilidades de ganar (50% o “Ap”). Sin embargo la *probabilidad* no mostró efectos estadísticamente significativos, de modo que los niveles de satisfacción parecen depender únicamente de la *valencia* y el *tamaño* de los resultados.

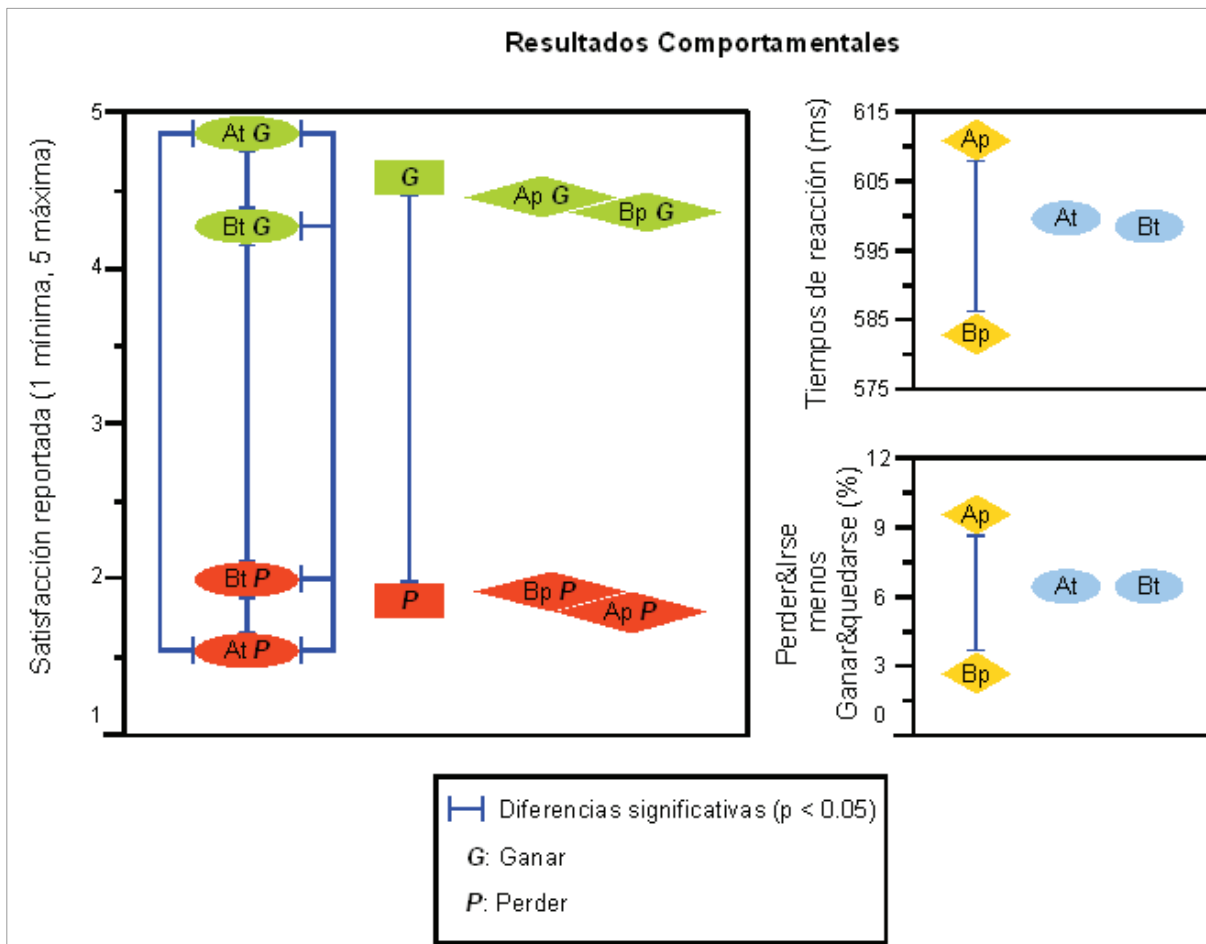
Los tiempos de reacción y la conducta de elección mostraron un patrón distinto, afectados por la *probabilidad* y no por el *tamaño* de las recompensas. Los *tiempos de reacción* fueron significativamente mayores para las categorías Bp en comparación a las Ap. Esto podría sugerir una mayor dificultad para elegir entre los dos botones de respuesta en las categorías Bp, posiblemente debida a la percepción de menores probabilidades de ganar.

Respecto a la *conducta de elección*, los feedbacks de pérdida fueron seguidos por una tendencia a no repetir la elección del botón que llevó a ese resultado. Lo contrario, repetir la elección tras un resultado positivo, no fue estadísticamente significativo. Este hallazgo sugiere que, a pesar de la imposibilidad de aprender un comportamiento óptimo en un juego de azar como el utilizado, los sujetos tomaron en consideración los feedbacks de pérdida para intentar evitar nuevas pérdidas. En el contexto de este trabajo, esta tendencia fue denominada *tendencia de evitación de pérdidas*, es decir, la tendencia a considerar más los feedbacks de pérdida para evitar repetir pérdidas, que los feedbacks de ganancia para intentar repetir ganancias. Al respecto los sujetos se muestran como *aprendices negativos* (“*negative learners*”, en Frank, Woroch, & Curran, 2005; Frank, D'Lauro, & Curran, 2007), aprendiendo más de los resultados negativos, que de los resultados positivos de sus decisiones.

Esta *tendencia de evitación de pérdidas*, en línea con resultados comportamentales

del estudio de Hewing y otros (2007), alcanza su máximo despliegue en las categorías Ap en comparación a las Bp. Entonces, la misma pérdida se muestra más aversiva en categorías donde ganar parecía más probable, con una mayor frecuencia de cambio comportamental. Resulta interesante que, mientras si afecta los reportes de satisfacción, las diferencias en el tamaño de las recompensas no obtenidas no afectan la presentación de esta tendencia. Estos resultados sugieren que los sujetos se sienten más involucrados cuando pierden en categorías Ap que cuando lo hacen en las Bp; y se sienten igualmente involucrados al perder en las categorías At y Bt. En otras palabras, la *probabilidad* de ganar, en vez del *tamaño* de las recompensas no conseguidas, define la probabilidad de un cambio de conducta tras perder.

Los resultados comportamentales en este estudio pueden ser interpretados a la luz de la distinción entre un tipo de información utilitaria y uno de desempeño, supuestamente portada por los feedbacks económicos (Li, Yuan, Jia, Feng, Chen & Li, 2009; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004). En una típica tarea de juego económico, la información utilitaria se refiere a las utilidades conseguidas en cada partida. Mientras tanto, la información de desempeño se referiría a la medida en que la elección, que produjo los resultados, fue correcta o incorrecta. Así, por ejemplo, un feedback que reporta una ganancia de \$50 tendría un valor utilitario positivo (ganar \$50) (Gehring & Willoughby, 2002) pero un valor de desempeño negativo si se revela que con una decisión alternativa se podría haber conseguido \$250 (Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004).



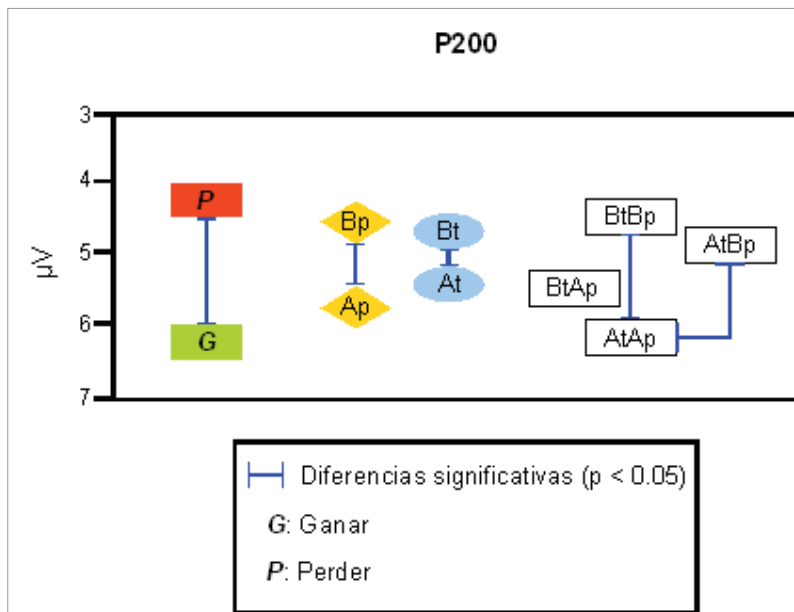
**Figura 10:** Principales resultados comportamentales. Los reportes de satisfacción son afectados por la interacción entre el *tamaño* de las recompensas en juego y la *valencia* de los resultados (Ganar vs. Perder). Los tiempos de reacción y la tendencia de evitación de pérdidas (perder & irse menos ganar & quedarse) se ven afectados por la *probabilidad* de ganar en cada categoría de juego.

En este estudio parece ser que el *tamaño* de las recompensas ofrecidas define la información utilitaria portada por los feedbacks, de modo que a mayor tamaño de las recompensas obtenidas, mayores índices de satisfacción, y a mayor tamaño de las recompensas no obtenidas, mayores reportes de frustración. Por otra parte, la *probabilidad* de recompensa parece definir la información de desempeño portada por los feedbacks. Los tiempos de reacción sugieren que los sujetos notan que ganar en las partidas Ap es más probable que ganar en las Bp. Como resulta esperable a partir de

esto, una decisión que lleva a perder en las partidas más fáciles (Ap) es peor evaluada que una que lleva a perder en las categorías difíciles (Bp), existiendo una mayor tendencia a no repetir elecciones de botón que llevaron a perder en las primeras. La distribución de *probabilidades* entre los posibles resultados, y no el *tamaño* de los montos considerados en esos resultados, parece ser el parámetro de evaluación para los sujetos al ponderar cuan correcta/incorrecta fue su elección. Tomados en conjunto, los resultados comportamentales sugieren que el *valor esperado*, por definirse en función del *tamaño* y *probabilidad* de los potenciales resultados, se muestra como un buen candidato para sintetizar la interacción entre la información utilitaria y la de desempeño; los dos tipos de información portada por los feedbacks que se han postulado como moduladoras del fERN (Li *et al.*, 2009; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004).

Dentro de los resultados de ERPs, lo primero que se observa es un P200 frontal. Aun pensando que esta deflexión podría asumirse como el inicio de la negatividad del fERN (Holroyd *et al.*, 2008; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004; Yeung, & Sanfey, 2004), se analizó como un fenómeno diferente por efectos distintos a aquellos típicamente observados en el fERN. En este estudio, el P200 se muestra modulado por el resultado de cada partida, en términos de ganar y perder (ver Figura 11), lo que podría sugerir una modulación por la saliencia de estímulo, en términos de una mayor saliencia de los feedbacks positivos. De hecho, el P200 se ha visto consistentemente asociado a altos niveles de arousal (Carretié, Mercado, Tapia & Hinojosa, 2001; Schutter, De Haan & Van Honk, 2004), y captura atencional por estímulos objetivo (Potts *et al.*, 1996; Potts, 2004; Potts *et al.*, 2006). Debido a la función a la que se ha asociado, este P200 también ha sido referido como positividad frontal de selección (FSP, por *frontal selection positivity*) (Kenemans *et al.*, 1993), y por su distribución, como un componente frontal-polar (FP) (Guillem *et al.*, 2001). En este estudio, el P200 aparece diferencialmente modulado por la alta *probabilidad* y el

alto *tamaño* de las recompensas ofrecidas, con independencia de si esas recompensas son obtenidas o no. Así, la categoría más saliente (AtAp), dado el alto *tamaño* y *probabilidad* de las recompensas ofrecidas, se diferencia de las otras tres categorías. Esto apoya la idea de modulación por facilitación atencional (Potts *et al.*, 1996; Potts, 2004; Potts *et al.*, 2006): mientras mayor y más probable es la recompensa ofrecida, mayor atención capturan los feedbacks. El hecho de que no se observen interacciones entre *valencia* y *categoría* de juego, o ni siquiera entre *valencia* y *probabilidades* o *tamaños* de recompensas, sugiere que en el estadio de procesamiento del P200 estos factores aun no han sido integrados. El P200 daría cuenta de una modulación atencional temprana, y no de una evaluación temprana de los resultados en el contexto de las categorías de juego. En otras palabras, por un lado los feedbacks de ganancia, y por otra los feedbacks que siguen a las categorías At y Ap, serían los objetivos más relevantes para la captura atencional.



**Figura 11:** Principales resultados en la ventana temporal entre los 180-230 ms. que siguen al feedback (P200). Los feedbacks de ganancia están asociados a mayores positividads que los feedbacks de pérdida. Independientemente de su *valencia*, los feedbacks que siguen a partidas Ap y At, están asociados a positividads mayores que esas asociadas, respectivamente, a Bp y Bt. También independientemente del resultado, los feedbacks que siguen a la categoría más atractiva (AtAp) están asociados a mayores positividads que el resto de las categorías; diferenciándose significativamente de BtBp y AtBp.

De acuerdo a la *reinforcement learning theory* del ERN, una señal negativa de error en la predicción de recompensa, que indica que los eventos son peores que los esperados, y que es vista como un descenso en la actividad fásica de las neuronas dopaminérgicas, es enviada por el sistema dopaminérgico del mesencéfalo hasta el ACC, donde elicitaria el fERN por desinhibir las dendritas apicales de las neuronas motoras presentes en éste (Holroyd & Coles, 2002). Siguiendo esta teoría, se esperaba que a mayor *valor esperado* del juego, mayor sería la negatividad asociada a las pérdidas. Esto también siguiendo evidencia que muestra que a menor *probabilidad de pérdida* (Cohen *et al.*, 2007; Hajcak *et al.*, 2005; Hewig *et al.*, 2007; Holroyd *et al.*, 2009; Potts, *et al.*, 2006) y a mayor *tamaño* de las recompensas no obtenidas (Gehring & Willoughby, 2002; Holroyd, Larsen *et al.*, 2004; Nieuwenhuis, Yeung *et al.*, 2004), mayor la amplitud del fERN. Los



resultados muestran una clara diferencia entre ganancias y pérdidas en la ventana temporal del fERN, con un fERN menos positivo asociado a los feedbacks de pérdida, sin embargo, cambios en *tamaño* y *probabilidad* sólo impactan la amplitud del fERN asociado a feedbacks de ganancia. Este resultado se suma a un creciente cuerpo de evidencia que muestra una mayor modulación del fERN para los feedbacks de ganancia en comparación a los de pérdida (Cohen *et al.*, 2007; Eppinger, Kray, Mock, & Mecklinger, 2008; Hajcak *et al.*, 2005; Hewig, Trippe, Hecht, Coles, Holroyd, & Miltner, 2008; Holroyd *et al.*, 2008; Potts *et al.*, 2006), de forma consistente con evidencia de que muestra mayores cambios en la actividad dopaminérgica para los estímulos positivos en comparación a los negativos (Schultz, 2002). En este sentido, los eventos positivos podrían estar asociados con un mayor impacto de las señales dopaminérgicas en sus objetivos neurales (Bayer & Glimcher, 2005).

En el estudio que se reporta, la modulación del fERN tras los feedbacks de ganancia y no tras los de pérdida, podría explicarse por la existencia de dos montos para los primeros y sólo uno para los segundos. Sin embargo, esta interpretación se enfrenta a evidencia que muestra al fERN modulado por el valor del feedback en el contexto de los otros posibles resultados, y no por su valor absoluto (Holroyd, Larsen *et al.*, 2004). Más aun, esta interpretación no explica por qué la *probabilidad* sólo modula al fERN de ganancia, dado que la *probabilidad* de recompensa afecta tanto a la ocurrencia de pérdidas como a la de ganancias. En cualquier caso, estudios futuros podrían explorar la plausibilidad de esta interpretación, por ejemplo invirtiendo el paradigma, manteniendo constante el monto de las ganancias y mostrando dos posibles montos de pérdida.

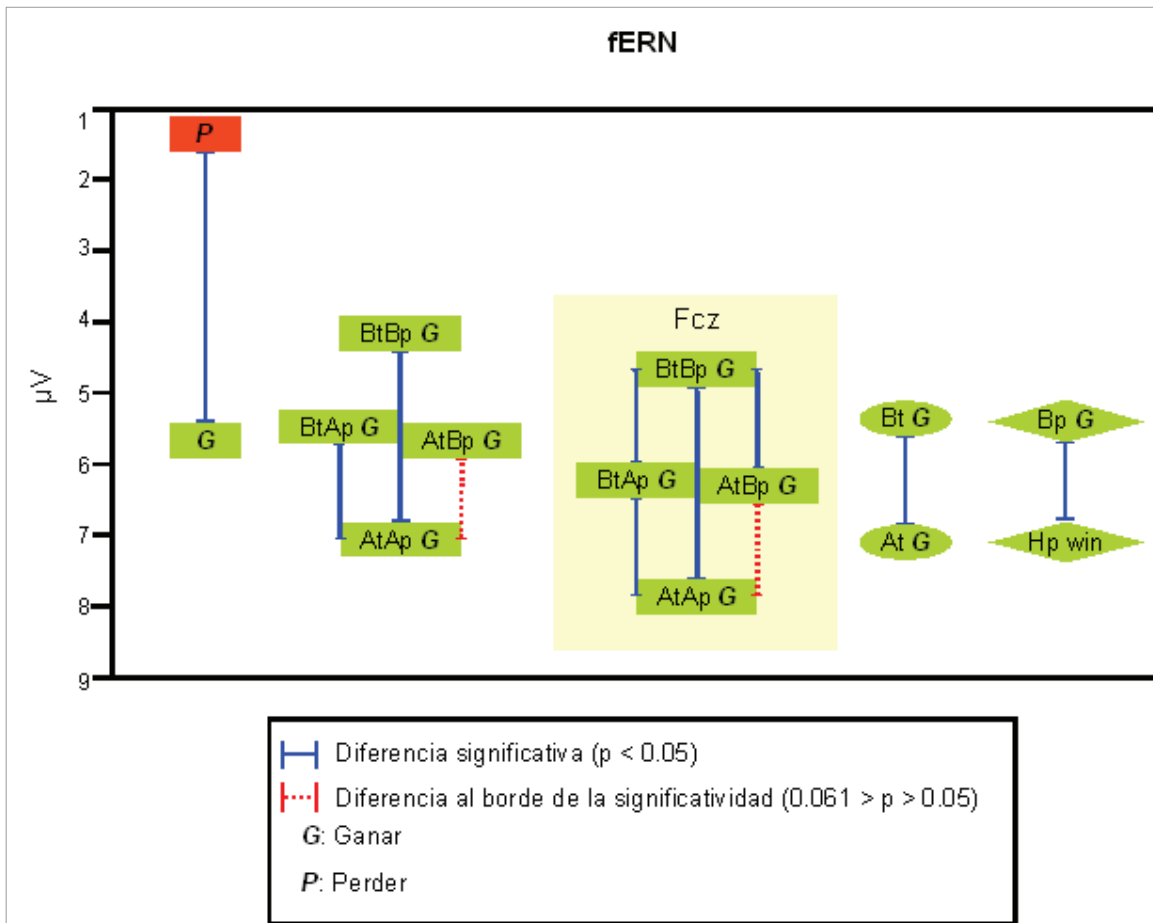
La existencia de modulación del fERN tras partidas ganadas pero no tras las pérdidas, es un hallazgo reciente (Cohen *et al.*, 2007; Holroyd *et al.*, 2008), y no aparecen patrones distintivos en los diseños experimentales que ayuden a explicar estos resultados.

Trabajos recientes proponen que los mecanismos de procesamiento de feedbacks podrían diferir entre ganancias y pérdidas (Cohen, *et al.*, 2007), y ha sido acuñada la idea de *feedback correct-related positivity* (fCRP) argumentando que las diferencias entre ganancias y pérdidas podrían ser mejor explicadas por la existencia de una positividad asociada a resultados mejores que los esperados, que por una negatividad asociada a los peores de lo esperado (Holroyd *et al.*, 2008).

La hipótesis del fCRP podría ayudar a comprender la existencia de modulación asociada a ganancias y no a pérdidas. Siguiendo esta idea, en vez de evocar un componente específico para los trials de error, los feedbacks de pérdida simplemente elicitarían un fenómeno común, el N200, el cuál en general es elicitado por eventos relevantes para las tareas en curso (Towey *et al.*, 1980). La positividad en los trials de ganancia reflejaría, o la inhibición del proceso que causa el N200, o la superposición de una deflexión positiva fronto-central (Holroyd *et al.*, 2008). Hasta la elaboración de este trabajo no existe un estudio que de pistas de cuál de estas dos alternativas es más plausible.

Ahora bien, la hipótesis del fCRP no parece suficiente para explicar la dirección de la modulación del ERP observada en este estudio (ver Figuras 4, 6 y 11). La *reinforcement learning theory* del ERN (Holroyd & Coles, 2002), aplicada a los trials correctos (Holroyd, 2004), dice que una señal positiva de error en la predicción de recompensa, que indica que los eventos son mejores de lo esperado, vista como un incremento en la actividad en fase de las neuronas dopaminérgicas, es recibida por el ACC, dónde reduce la amplitud del fERN (o amplifica la amplitud del fCRP) por inhibir las dendritas apicales de las neuronas motoras que ahí se encuentra. La diferencia entre resultados esperados, y resultados efectivos mejores que los esperados, definiría el valor motivacional de los feedbacks de ganancia (Potts *et al.*, 2006), de lo que la amplitud del fCRP sería índice. De

acuerdo con esto debiéramos observar una mayor positividad asociada a las mayores recompensas (At), como ocurre, pero también debiéramos observar mayores positivities asociadas a las recompensas menos probables (Bp). Lo último no sólo no ocurre, ocurre de forma significativa lo contrario.

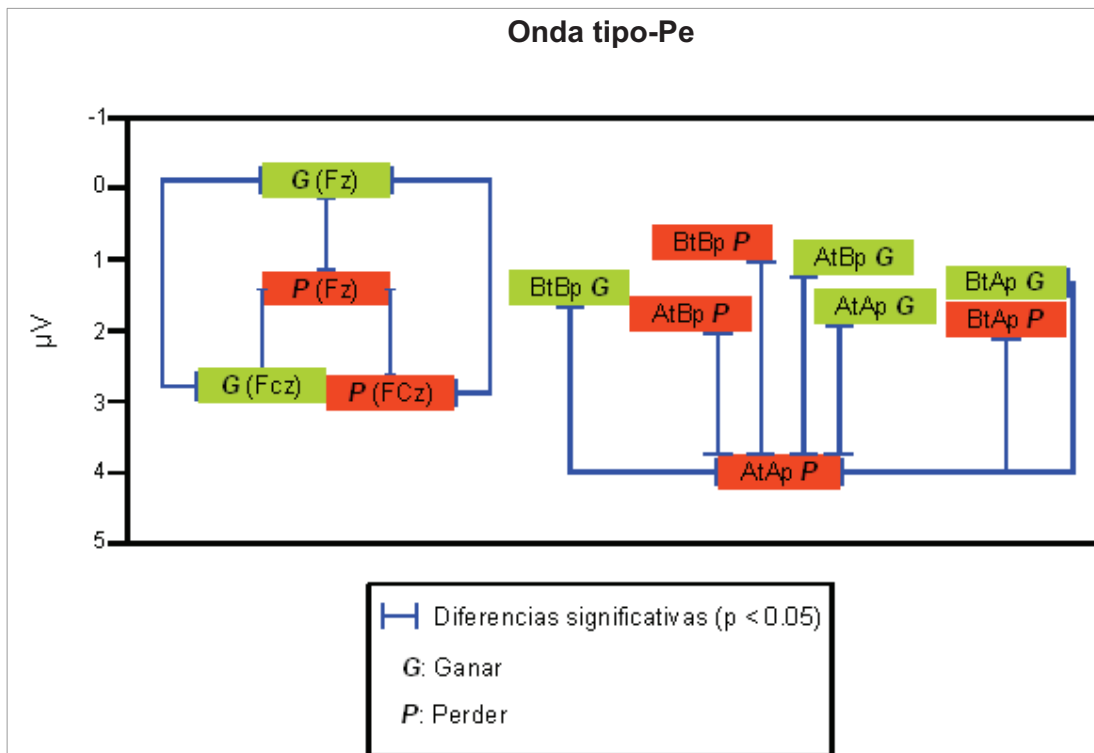


**Figura 12:** Principales resultados en la ventana temporal de los 240-310 ms. que siguen al feedback (fERN). Los feedbacks de ganancia están asociados a mayores positivities que los de pérdida. Dentro de las condiciones de pérdida no se observan diferencias. Dentro de las condiciones de ganancia, ganar en la categoría que presenta el mayor valor esperado (AtAp) se asocia a las mayores positivities, mientras que ganar en aquella con el menor valor esperado (BtBp) se asocia a las menores positivities. Ganar en categorías con valores esperados equivalentes (AtBp & BtAp) no se asocia a diferencias en la amplitud del fERN. En este mismo sentido, feedbacks de ganancia que siguen a categorías At y Ap, se asocian a positivities mayores que aquellas que siguen a ganar en categorías Bt y Bp.

En este trabajo se considera que el patrón comportamental referido a la *tendencia de evitación de pérdida* está muy relacionado a los resultados encontrados en torno al fERN. De acuerdo a esto, los sujetos estarían más enfocados a evitar perder que a intentar ganar. Desde la perspectiva de la información utilitaria lo más importante sería evitar perder en las categorías At (evidenciado en resultados de reportes de satisfacción), pero desde la perspectiva de la información de desempeño lo más importante sería evitar perder en las categorías Ap (evidenciado en tiempos de reacción y conducta de elección). Así, el feedback de ganancia que poseería el mayor valor motivacional, tal como sugieren los resultados en torno al fERN, sería el que señala una ganancia tras la categoría AtAp, feedback que portaría el mayor valor utilitario y de desempeño. Los feedbacks de ganancia que siguen a las categorías con valor esperado equivalente, AtBp y BtAp, tendrían valores motivacionales indistinguibles, por lo que serían seguidos por amplitudes indistinguibles en la positividad que les sigue. Finalmente, ganar en la categoría BtBp tendría el menor valor motivacional, lo que explicaría la menor positividad a que se le asocia en la ventana temporal del fERN (ver Figuras 4 y 11).

De acuerdo a esta sugerencia, tanto el *tamaño* como la *probabilidad* de las recompensas ofrecidas modularían en valor motivacional de los feedbacks de ganancia. El *tamaño* regularía el valor utilitario de las recompensas conseguidas, la *probabilidad* definiría el valor de desempeño de los feedbacks recibidos. La amplitud de la positividad que sigue a los feedbacks de ganancia daría cuenta de su valor motivacional, pero no de forma independiente del valor motivacional de perder. “Lo bueno de ganar” tendría que ver con “lo malo de perder”, y “lo malo de perder” tendría que ver con el valor esperado de la situación. No se está en condiciones de presentar esta interpretación como concluyente hasta que se realicen estudios específicamente diseñados para contrastar esta hipótesis del valor por evitación de pérdidas para los feedbacks de ganancia. Reportes respecto del

rol funcional del ACC (Botvinick, 2007; Magno, Foxe, Molholm, Robertson & Garavan, 2006), y sus vínculos con el córtex medial orbitofrontal (Coricelli, Critchley, Joffily, O'Doherty, Sirigu & Dolan, 2005; Kim, Shimojo & O'Doherty, 2006) en la regulación del aprendizaje evitativo en humanos, muestra a éste como un asunto interesante para la ampliación de la investigación en torno al fERN/fCRP. El hecho de que este patrón de comportamiento evitativo sea la principal pista encontrada por este estudio para explicar la modulación por probabilidad del fERN, también sugiere la conveniencia de analizar un posible efecto cultural. Según el conocimiento del autor, este es el primer estudio en torno al fERN que se realiza en Iberoamérica, habiéndose realizado en Estados Unidos, Canadá y Alemania la mayoría de los trabajos aquí citados. Un estudio trans-cultural, basado en el paradigma diseñado, podría arrojar luces sobre esta idea. Esto parece especialmente interesante; de algún modo se estaría contrastando la clásica afirmación de Max Weber (1930) respecto de una mayor atención y mejor actitud hacia el lucro dentro de las culturas protestantes.



**Figura 13:** Principales resultados en la ventana temporal de los 365-440 ms. que siguen a la presentación del feedback (onda tipo-Pe). Diferencias entre ganar y perder son observadas sólo en Fz, con una mayor positividad para lo último en este electrodo. Tomados en conjunto Fz y FCz, perder en la categoría con mayor valor esperado (AtAp) se asocia a la mayor positividad, diferenciándose del resto de las condiciones experimentales.

Finalmente, los resultados de potenciales relacionados a eventos muestran una positividad tardía distinguiendo entre perder en la categoría más saliente, que posee en mayor valor esperado (AtAp), y el resto de las condiciones experimentales. Este componente alcanza su máximo en Fz, en línea con evidencia de imagen por resonancia magnética funcional (fMRI) referida al rol del ACC rostral en respuestas al error relacionadas con la pérdida (Taylor, Martis, Fitzgerald, Welsh, Abelson, Liberzon, Himle & Gehring, 2006). La positividad observada tiene una distribución frontal (ver Figura 9), y discrimina según la valencia del resultado. Esto la distingue del P300 normalmente asociado al fERN, el cual tiene una distribución posterior (Donchin & Coles, 1988; Holroyd, 2004; Yeung, & Sanfey, 2004) y es modulado por la magnitud de los feedbacks,

en vez de su valencia (Hajcak *et al.*, 2005; Nieuwenhuis, Holroyd *et al.*, 2004; Yeung, & Sanfey, 2004). Dada su distribución en el cuero cabelludo, y dado que alcanza su máximo en asociación a la pérdida más saliente ( $AtAp_{Perder}$ ), ese componente ha sido reportado aquí como tipo-Pe, en referencia a la positividad de error (Pe) asociada al ERN de respuesta (Boksem *et al.*, 2008; Nieuwenhuis *et al.*, 2001; O'Connell *et al.*, 2007; Shalgi *et al.*, 2009). En paradigmas de tiempo de reacción, la Pe se ha interpretado como un índice de conciencia del error (Nieuwenhuis *et al.*, 2001; O'Connell *et al.*, 2007). Los resultados reportados en esta investigación de tesis, muestran que en la ventana temporal del fERN sólo existe una discriminación general de las pérdidas, de modo que la onda tipo-Pe podría presentarse como un índice de un proceso evaluativo tardío respecto del valor motivacional específico de cada tipo de pérdida. Es este proceso evaluativo la condición  $AtAp_{Perder}$  destacaría como la peor de las pérdidas.

Para finalizar, según el conocimiento del autor, este es el primer reporte referido a los efectos del valor esperado en el fERN, y no sólo respecto de los efectos aislados del *tamaño* y la *probabilidad* de las ganancias y pérdidas. Resumiendo, los resultados permiten concluir que los feedbacks de ganancia, y los feedbacks que siguen a categorías con la mayor magnitud y probabilidad de recompensa positiva, son capturados diferencialmente por la atención en una etapa pre-fERN. En la etapa del fERN existe sólo una discriminación general de las pérdidas, y una discriminación más detallada de las ganancias. En una tercera etapa, una positividad frontal aparece discriminando entre la peor de las pérdidas y el resto de las condiciones experimentales. Dentro de la ventana temporal del fERN, tanto el *tamaño* como la *probabilidad* de las recompensas, además de su interacción en un valor esperado, modulan el valor motivacional de los feedbacks de ganancia. Esto ocurre en directa relación con la distinción entre información utilitaria y de desempeño, y en directa relación con una *tendencia de evitación de pérdidas* que asigna

un mayor valor de desempeño a evitar perder en las condiciones que con mayor probabilidad entregan recompensa. De este modo, mientras mayor es el valor esperado, mejor evaluación subjetiva recibiría la evitación de la pérdida indicada por el feedback de ganancia. Se considera como una importante meta para la investigación en torno al fERN/fCRP, explorar específicamente la hipótesis del valor por evitación de la pérdida de los feedbacks de ganancia.



## 7. REFERENCIAS

Baddeley, A. D. (1986). The central executive and its malfunctions. En: A. D. Baddeley (Ed.), *Working memory* (pp. 224–253). New York: Oxford University Press.

Bates, J. F., & Goldman-Rakic, P. S. (1993). Prefrontal connections of medial motor areas in the rhesus monkey. *Journal of Comparative Neurology*, 336, 211–228.

Bayer, H.M., Glimcher, P.W. (2005). Midbrain dopamine neurons encode a quantitative reward prediction error signal. *Neuron*, 47, 129–14.

Bentivoglio, M., Kultas-Ilinsky, K., & Ilinsky, I. (1993). Limbic thalamus: Structure, intrinsic organization, and connections. En: B. A. Vogt & M. Gabriel (Eds.), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: A comprehensive handbook* (pp. 71–122). Boston: Birkhauser.

Berger, B., Gaspar, P., & Verney, C. (1991). Dopaminergic innervation of the cerebral cortex: Unexpected differences between rodents and primates. *Trends in Neurosciences*, 14, 21–27.

Bernstein, P. S., Scheffers, M. K., & Coles, M. G. H. (1995). “Where did I go wrong?” A psychophysiological analysis of error detection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, 1312–1322.

Berridge, K. C., & Robinson, T. E. (1998). What is the role of dopamine in reward: Hedonic impact, reward learning, or incentive salience? *Brain Research Reviews*, 28, 309–369.

Boksem, M., Tops, M., Kostermans, E., De Cremer, D. (2008). Sensitivity to punishment and reward omission: Evidence from error-related ERP components. *Biological Psychology*, 79, 185-192.

Botvinick M.M., Braver T.S., Barch D.M., Carter C. S., Cohen J.D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 624-652.

Botvinick, M.M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 7, 356-366.

Botvinick, M.M., Cohen, J.D., Carter, C.S., (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Science*, 8, 539–546.

Braver, T. S., Barch, D. M., Gray, J. R., Molfese, D. L., & Snyder, A. Z. (2001). Anterior cingulate and response conflict: Effects of frequency, inhibition, and errors. *Cerebral Cortex*, 11, 825–836.

Brooks, V. B. (1986). How does the limbic system assist motor learning? A limbic comparator hypothesis. *Brain, Behavior and Evolution*, 29, 29–53.

Brooks, V. B. (1989). Limbic assistance in task-related use of motor skill. En: J. C. Eccles (Ed.), *Principles of design and operation of the brain* (pp.343–368). Berlin, Germany: Springer-Verlag.

Brown, L. L., Schneider, J. S., & Lidsky, T. I. (1997). Sensory and cognitive functions of the basal ganglia. *Current Opinion in Neurobiology*, 7, 157–163.

Bussey, T. J., Muir, J. L., Everitt, B. J., & Robbins, T. W. (1996). Dissociable effects of anterior and posterior cingulate cortex lesions on the acquisition of a conditional visual discrimination: Facilitation of early learning vs. impairment of late learning. *Behavioral Brain Research*, 82, 45–56.

Calabresi, P., Pisani, A., Mercuri, N. B., & Bernardi, G. (1996). The corticostriatal projection: From synaptic plasticity to dysfunctions of the basal ganglia. *Trends in Neurosciences*, *19*, 19–24.

Carretié L, Mercado F, Tapia M, Hinojosa J. (2001). Emotion, attention, and the 'negativity bias', studied through event-related potentials. *International Journal of Psychophysiology*, *41*, 75–85

Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D., & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, *280*, 747–749.

Channon, S., & Crawford, S. (1999). Problem-solving in real-life-type situations: The effects of anterior and posterior lesions on performance. *Neuropsychologia*, *37*, 757–770.

Clithero, J.A., Tankersley, D. & Huettel, S.A. (2008) Foundations of neuroeconomics: from philosophy to practice. *PLoS Biol*, *6*, e298 (Epub).

Cohen, M., Elger, C., Ranganath, C. (2007). Reward expectation modulates feedback - related negativity and EEG spectra. *NeuroImage*, *35*, 968-97.

Coles, M. G. H., & Rugg, M. D. (1995). Event-related brain potentials: An introduction. En: M. D. Rugg & M. G. H. Coles (Eds.), *Electrophysiology of mind* (pp. 1–26). Oxford, England: Oxford University Press.

Coles, M. G. H., Scheffers, M. K., & Holroyd, C. (1998). Berger's dream? The error-related negativity and modern cognitive psychophysiology. En: H. Witted, U. Zweiner, B. Schack, & A. Doering (Eds.), *Quantitative and topological EEG and MEG analysis* (pp. 96–102). Jena-Erlangen, Germany: Druckhaus Mayer Verlag.

Coricelli, G., Critchley, H.D., Joffily, M., O'Doherty, J.P., Sirigu, A., Dolan, R.J. (2005). Regret and its avoidance: a neuroimaging study of choice behavior. *Nature Neuroscience*, 8, 1255-62.

Cummings, J. L. (1993). Frontal-subcortical circuits and human behavior. *Archives of Neurology*, 50, 873-880.

Damasio, A. R. (1994). *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*. New York: Avon Books.

Damasio, A. R., & Van Hoesen, G. W. (1983). Emotional disturbances associated with focal lesions of the limbic frontal lobe. En: K. M. Heilman & P. Satz (Eds.), *Neuropsychology of human emotion* (pp. 85-110). New York: Guilford Press.

Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5, 303-305.

Delorme, A., Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134, 9-21.

Devinsky, O., Morrell, M. J., & Vogt, B. A. (1995). Contributions of anterior cingulate cortex to behavior. *Brain*, 118, 279-306.

Diehl, B., Dinner, D. S., Mohamed, A., Najm, I., Klem, G., LaPresto, E., Bingaman, W., Lüders, H.O. (2000). Evidence of cingulate motor representation in humans. *Neurology*, 55, 725-728.

Donchin, E., & Coles, M.G.H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 355-372.

Dum, R. P., & Strick, P. L. (1993). Cingulate motor areas. En: B. A. Vogt & M. Gabriel (Eds.), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: A comprehensive handbook* (pp. 415– 441). Boston: Birkhauser.

Elliott, R., & Dolan, R.J. (1998). Activation of different anterior cingulate foci in association with hypothesis testing and response selection. *NeuroImage*, 8, 17–29

Eppinger, B., Kray, J., Mock, B., & Mecklinger, A. (2008). Better or worse than expected? Aging, learning and the ERN. *Neuropsychologia*, 46, 521–539.

Falkenstein, M., Hohnsbein, J., Hoormann, J., & Blanke, L. (1990). Effects of errors in choice reaction tasks on the ERP under focused and divided attention. En: C. Brunia, A. Gaillard, and A. Kok (Eds.), *Psychophysiological Brain Research* (pp. 192-195). Tilburg, The Netherlands: Tilburg University Press.

Fiorillo, C., Tobler, P., Schultz, W., 2003. Discrete coding of reward *probability* and uncertainty by dopamine neurons. *Science*, 299, 1898–1902.

Frank, M., D'Lauro, C. & Curran, T. (2007). Cross-task individual differences in error processing: Neural, electrophysiological and genetic components. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 7, 297-308.

Frank, M., Woroch, B., & Curran, T. (2005). Error-related negativity predicts reinforcement learning and conflict biases. *Neuron*, 47, 495-501.

Gabriel, M. (1993). Discriminative avoidance learning: A model system. En: B. A. Vogt & M. Gabriel (Eds.), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: A comprehensive handbook* (pp. 478–523). Boston: Birkhauser.

Gaspar, P., Berger, B., Febvret, A., Vigny, A., & Henry, J. P. (1989). Catecholamine innervation of the human cerebral cortex as revealed by comparative immunohistochemistry of tyrosine hydroxylase and dopamine-beta-hydroxylase. *Journal of Comparative Neurology*, 279, 249–271.

Gehring, W. & Willoughby, A. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, 295, 2279–2282.

Gehring, W. J. (1992). The error-related negativity: Evidence for a neural mechanism for error-related processing. *Unpublished doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana–Champaign*.

Gehring, W. J., & Knight, R. T. (2000). Prefrontal-cingulate interactions in action monitoring. *Nature Neuroscience*, 3, 516–520.

Gehring, W. J., Himle, J., & Nisenson, L. G. (2000). Action-monitoring deficits in obsessive–compulsive disorder. *Psychological Science*, 11, 1–6.

Gehring, W., Goss, B., Coles, M., Meyer, D. & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4, 385–389.

Gemba, H., Sasaki, K., & Brooks, V. B. (1986). “Error” potentials in limbic cortex (anterior cingulate area 24) of monkeys during motor learning. *Neuroscience Letters*, 70, 223–227.

Gratton, G., Coles, M.G.H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 468-484.

Guillem, F., Bicu, M., & Debruille, J. B. (2001). Dissociating memory processes involved in direct and indirect tests with ERPs to unfamiliar faces. *Cognitive Brain Research*, *11*, 113–125.

Haber, S. N., & Fudge, J. L. (1997). The primate substantia nigra and VTA: Integrative circuitry and function. *Critical Reviews in Neurobiology*, *11*, 323–342.

Hajcak, G., Holroyd, C.B., Moser, J., Simons, R. (2005). Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes, *Psychophysiology*, *42*, 161–170.

Hewig J., Trippe R., Hecht H., Coles M.G.H., Holroyd C.B., Miltner W.H.R. (2007). Decision-making in Blackjack: An electrophysiological analysis. *Cerebral Cortex*, *17*, 865-877.

Hewig, J., Trippe, R.H., Hecht, H., Coles, M.G.H., Holroyd, C.B., & Miltner, W.H.R. (2008). An electrophysiological analysis of coaching in blackjack. *Cortex*, *44*, 1197–1205.

Holroyd, C. B. (2001). Reinforcement learning and the error-related negativity: A computational and neurophysiological investigation. *Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana–Champaign*.

Holroyd, C. B., Dien, J., & Coles, M. G. H. (1998). Error-related scalp potentials elicited by hand and foot movements: Evidence for an output-independent error-processing system in humans. *Neuroscience Letters*, *242*, 65–68.

Holroyd, C.B, Hajcak, G., Larsen, J. (2006). The good, the bad and the neutral: Electrophysiological responses to feedback stimuli. *Cognitive Brain Research*, *1105*, 93-101.

Holroyd, C.B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N. & Cohen, J.D. (2003). Errors in reward prediction are reflected in the event-related brain potential. *Neuroreport*, *14*, 2481–2484.

Holroyd, C.B. (2004). A note on the Oddball N200 and the feedback ERN. En: M. Ullsperger & M. Falkenstein (Eds.), *Errors, Conflicts, and the Brain. Current Opinions on Performance Monitoring* (pp. 211–218). Leipzig: MPI of Cognitive Neuroscience.

Holroyd, C.B., & Coles, M.G.H. (2002). The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, *109*, 679-709.

Holroyd, C.B., & Krigolson, O.E. (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, *44*, 913-917.

Holroyd, C.B., Coles, M.G.H. & Nieuwenhuis, S. (2002). Medial prefrontal cortex and error potentials. *Science*, *296*, 1610–1611.

Holroyd, C.B., Krigolson, O.E., Baker, R., Lee, S., Gibson, J. (2009). When is an error not a prediction error? An electrophysiological investigation. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *9*, 59-70.

Holroyd, C.B., Larsen, J., Cohen, J.D. (2004). Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psychophysiology*, *41*, 245–53.



Holroyd, C.B., Nieuwenhuis, S., Mars, R., & Coles, M.G.H. (2004). Anterior cingulate cortex, selection for action, and error processing. En: M. Posner (Ed.), *Cognitive neuroscience of attention* (pp. 219-231). New York: Guilford Publishing, Inc.

Holroyd, C.B., Pakzad-Vaezi, K.L., & Krigolson, O.E. (2008). The feedback correct-related positivity: Sensitivity of the event-related brain potential to unexpected positive feedback. *Psychophysiology*, *45*, 688-697

Holroyd, C.B., Yeung, N., Coles, M.G.H. & Cohen, J.D. (2005). A mechanism for error detection in speeded response time tasks. *Journal of Experimental Psychology*, *134*, 163–191.

Jahanshahi, M., Jenkis, I. H., Brown, R. G., Marsden, C. D., Passingham, R. E., & Brooks, D. J. (1995). Self-initiated versus externally triggered movements. *Brain*, *118*, 913–933.

Jenkins, I. H., Brooks, D. J., Nixon, P. D., Frackowiak, R. S. J., & Passingham, R. E. (1994). Motor sequence learning: A study with positron emission tomography. *Journal of Neuroscience*, *14*, 3775–3790.

Johnson, T. M., Otten, L. J., Boeck, K., & Coles, M. G. H. (1997). Am I too late? The neural consequences of missing a deadline. *Psychophysiology*, *34*, S48.

Kenemans, J.L., Kok, A., & Smulders, F.T. (1993). Event-related potentials to conjunctions of spatial frequency and orientation as a function of stimulus parameters and response requirements. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *88*, 51–63.

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.

Kim, H., Shimojo S., and O'Doherty, J.P. (2006). Is avoiding an aversive outcome rewarding? The neural substrates of avoidance learning in the human brain. *Plos Biology*, 4, e233 (Epub).

Knutson, B., Westdorp, A., Kaiser, E., & Hommer, D. (2000). FMRI visualization of brain activity during a monetary incentive delay task. *NeuroImage*, 12, 20–27.

Knutson, B., Westdorp, A., Kaiser, E., & Hommer, D. (2000). FMRI visualization of brain activity during a monetary incentive delay task. *NeuroImage*, 12, 20–27.

Li, P., Yuan, J., Jia, S., Feng, T., Chen, A., Li, H. (2009). Feedback-related negativity effects vanished with false or monetary loss choice. *Neuroreport*, 20, 788-92.

Luria, A. R. (1973). *The working brain: An introduction to neuropsychology* (B. Haigh, Trans.). New York: Basic Books.

Luu, P., Flaisch, T., & Tucker, D. M. (2000). Medial frontal cortex in action monitoring. *Journal of Neuroscience*, 20, 464–469.

Magno, E., Foxe, J.J., Molholm, S., Robertson, I.H., Garavan, H. (2006) The anterior cingulate and error avoidance. *Journal of Neuroscience*, 26, 4769-4773

Mars, R., De Bruijn, E., Hulstijn, W., Miltner, W.H.R. & Coles, M.G.H. (2004). What if I told you: “you were wrong”? Brain potentials and behavioral adjustments elicited by feedback in a time-estimation task. En: Ullsperger, M., Falkenstein, M. (Eds.). *Errors, conflicts, and the brain. Current opinions on performance monitoring* (pp. 129-134). Leipzig: MPI of Cognitive Neuroscience.

Menon, V., Adleman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a go/no-go response inhibition task. *Human Brain Mapping, 12*, 131–143.

Miller EK, Cohen JD (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience, 24*, 167–202.

Miltner, W.H.R., Braun, C.H., & Coles, M.G.H. (1997). Event-related brain potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a “generic” neural system for error detection. *Journal of Cognitive Neuroscience, 9*, 788-798.

Mora, F., & Myers, R. D. (1977). Brain self-stimulation: Direct evidence for the involvement of dopamine in the prefrontal cortex. *Science, 197*, 1387–1389.

Morecraft, R. J., & Van Hoesen, G. W. (1998). Convergence of limbic input to the cingulate motor cortex in the rhesus monkey. *Brain Research Bulletin, 45*, 209–232.

Morecraft, R. J., Van Hoesen, G. W., & Maynard, J. A. (1989). Cortical afferents to caudal area 24c (the cingulate motor area) and rostral area 23c. *Society for Neuroscience Abstracts, 15*, 73.

Nakahara, H., Itoh, H., Kawagoe, R., Takikawa, Y., Hikosaka, O. (2004). Dopamine neurons can represent context-dependent prediction error. *Neuron, 41*, 269 – 280.

Nieuwenhuis, S., Holroyd, C. B., Mol, N., & Coles, M.G.H. (2004). Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: Origins and functional significance. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 28*, 441-448.

Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K. R., Blom, J., Band, G. P. H., & Kok, A. (2001). Error-related potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology, 38*, 752–760.

Nieuwenhuis, S., Ridderinkhof, K., Blom, J., Band, G., Kok, A. (2001). Error-related brain potentials are differentially related to awareness of response errors: Evidence from an antisaccade task. *Psychophysiology*, 38, 752–760.

Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Holroyd, C., Schurger, A., Cohen, J.D. (2004). Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cerebral Cortex*, 14, 741-747.

Niki, H., & Watanabe, M. (1979). Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey. *Brain Research*, 171, 213–224.

O'Connell, R., Dockree, P., Bellgrove, M., Kelly, S., Hester, R., Garavan, H., Robertson, I., Foxe, J. (2007). The role of cingulate cortex in the detection of errors with and without awareness: a high-density electrical mapping study. *European Journal of Neuroscience*, 25, 2571-2579.

Olds, J., & Milner, P. (1954). Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 47, 419–427.

Pan, W.-X. , Schmidt, R., Wickens, J.R., and Hyland, B.I. (2005). Dopamine cells respond to predicted events during classical conditioning: Evidence for eligibility traces in the reward-learning network. *Journal of Neuroscience*, 25 , 6235 – 6242 .

Paus, T., Petrides, M., Evans, A. C., & Meyer, E. (1993). Role of the human anterior cingulate cortex in the control of oculomotor, manual, and speech responses: A positron emission tomography study. *Journal of Neurophysiology*, 70, 453–462.

Pennartz, C. M. A. (1996). The ascending neuromodulatory systems in learning by reinforcement: Comparing computational conjectures with experimental findings. *Brain Research Reviews*, 21, 219–245.

Picard, N., & Strick, P. L. (1996). Motor areas of the medial wall: A review of their location and functional activation. *Cerebral Cortex*, 6, 342–353.

Posner, M. I., & DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. En: R. Parasuraman (Ed.), *The attentive brain* (pp. 401–423). Cambridge, MA: MIT Press.

Potts, G.F. (2004). An ERP index of task relevance evaluation of visual stimuli. *Brain & Cognition*, 56, 5–13.

Potts, G.F., Liotti, M., Tucker, D.M., & Posner, M.I. (1996). Frontal and inferior temporal cortical activity in visual target detection: Evidence from high spatially sampled event-related potentials. *Brain Topography*, 9, 3–14.

Potts, G.F., Martin, L.M., Burton, P. & Montague, P.R. (2006). When things are better or worse than expected: The medial frontal cortex and allocation of processing resources. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 1112–1119.

Pratt, W. E., & Mizumori, S. J. Y. (2001). Neurons in rat medial prefrontal cortex show anticipatory rate changes to predictable differential rewards in a spatial memory task. *Behavioral Brain Research*, 123, 165–183.

Procyk, E., Tanaka, Y.L., & Joseph, J.P. (2000). Anterior cingulate activity during routine and non-routine sequential behaviors in macaques. *Nature Neuroscience*, 3, 502–508.

Redgrave, P., Prescott, T. J., & Gurney, K. (1999). Is the short-latency dopamine response too short to signal reward error? *Trends in Neurosciences*, 22, 146–151.

Richardson, N. R., & Gratton, A. (1998). Changes in medial prefrontal cortical dopamine levels associated with response-contingent food reward: An electrochemical study in rat. *Journal of Neuroscience*, 18, 9130–9138.

Routtenberg, A., & Sloan, M. (1972). Self-stimulation in the frontal cortex of *rattus norvegicus*. *Behavioral Biology*, 7, 567–572.

Sanfey, A.G., Loewenstein, G., McClure, S.M. & Cohen, J.D. (2006) Neuroeconomics: cross-currents in research on decision-making. *Trends in Cognitive Science*, 10, 108–116.

Scherg, M. (1990). Fundamentals of dipole source potential analysis. En: F. Grandori, M. Hoke, & G. L. Romani (Eds.), *Auditory evoked magnetic fields and electric potentials* (pp. 40–69). Basel, Switzerland: Karger.

Scherg, M., & Picton, T. W. (1991). Separation and identification of event-related potential components by brain electric source analysis. En: C. H. M. Brunia, G. Mulder, & M. N. Verbaten (Eds.), *Event-related brain research (EEG suppl. 42)* (pp. 24–37). Amsterdam: North-Holland/ Elsevier.

Schultz, W. (1997). Dopamine neurons and their role in reward mechanisms. *Current Opinion in Neurobiology*, 7, 191–197.

Schultz, W. (1998). Predictive reward signal of dopamine neurons. *Journal of Neurophysiology*, 80, 1–27.

Schultz, W. (2002). Getting formal with dopamine and reward. *Neuron*, 36, 241-263.

Schultz, W. (2008) Introduction. Neuroeconomics: the promise and the profit. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 3767-3769.

Schultz, W. (2009). Midbrain Dopamine Neurons: A Retina of the Reward System?. En: Glimcher P. W., Camerer C. F., Fehr E., Poldrack, R. A. (Eds.), *Neuroeconomics: Decision making and the brain* (pp. 503-522). New York: Academic Press.

Schultz, W., Dayan, P. & Montague, P.R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275, 1593–159.

Schultz, W., Romo, R., Ljungberg, T., Mirenowicz, J., Hollerman, J. R., & Dickinson, A. (1995). Reward-related signals carried by dopamine neurons. En: J. Houk, J. Davis, & D. Beiser (Eds.), *Models of information processing in the basal ganglia* (pp. 233–248). Cambridge, MA: MIT Press.

Schutter, D., De Haan, E. & Van Honk, J. (2004). Functionally dissociated aspects in anterior and posterior electrocortical processing of facial threat. *International Journal of Psychophysiology*, 53, 29-36.

Shalgi., S., Barkan, I. & Deouell, L.Y. (2009) On the positive side of error processing: error-awareness positivity revisited. *European Journal of Neuroscience*, 29, 1522-1532.

Shima, K., & Tanji, J. (1998). Role for cingulate motor area cells in voluntary movement selection based on reward. *Science*, 282, 1335–1338.

Smiley, J. F., Williams, S. M., Szigeti, K., & Goldman-Rakic, P. S. (1992). Light and electron microscopic characterization of dopamine-immunoreactive axons in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 321, 325–335.

Smith, A. D., & Bolam, J. P. (1990). The neural network of the basal ganglia as revealed by the study of synaptic connections of identified neurones. *Trends in Neurosciences*, 13, 259–265.

Stuss, D. T., & Benson, D. F. (1986). *The frontal lobes*. New York: Raven Press.

Sutton, R. S. (1988). Learning to predict by the methods of temporal differences. *Machine Learning*, 3, 9–44.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1990). Time-derivative models of Pavlovian reinforcement. En: M. Gabriel & J. Moore (Eds.), *Learning and computational neuroscience: Foundations of adaptive networks* (pp. 497–537). Cambridge, MA: MIT Press.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. Cambridge, MA: MIT Press.

Takenouchi, K., Nishijo, H., Uwano, T., Tamura, R., Takigawa, M., & Ono, T. (1999). Emotional and behavioral correlates of the anterior cingulate cortex during associative learning in rats. *Neuroscience*, 93, 1271–1287.

Taylor, S., Martis, B., Fitzgerald, K., Welsh, R., Abelson, J., Liberzon, I., Himle, J. & Gehring, W. (2006). Medial frontal cortex activity and loss-related responses to errors. *Journal of Neuroscience*, 26, 4063–70.

Toni, I., & Passingham, R. E. (1999). Prefrontal–basal ganglia pathways are involved in the learning of arbitrary visuomotor associations: A PET study. *Experimental Brain Research*, 127, 19–32.

Towey, J., Rist, F., Hakerem, G., Ruchkin, D. S., & Sutton, S. (1980). N250 latency and decision time. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 15, 365–368.

Trepel, C., Fox, C. & Poldrack, R. (2005). Prospect theory on the brain? Toward a cognitive neuroscience of decision under risk. *Cognitive Brain Research*, 23, 34–50.



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.

Van Hoesen, G. W., Morecraft, R. J., & Vogt, B. A. (1993). Connections of the monkey cingulate cortex. En: B. A. Vogt & M. Gabriel (Eds.), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: A comprehensive handbook* (pp. 249–284). Boston: Birkhauser.

Vogt, B. A., Nimchinsky, E. A., Vogt, L. J., & Hof, P. R. (1995). Human cingulate cortex: Surface features, flat maps, and cytoarchitecture. *Journal of Comparative Neurology*, *359*, 490–506.

Vogt, B. A., Sikes, R. W., & Vogt, L. J. (1993). Anterior cingulate cortex and the medial pain system. En: B. A. Vogt & M. Gabriel (Eds.), *Neurobiology of cingulate cortex and limbic thalamus: A comprehensive handbook* (pp. 313–344). Boston: Birkhauser.

Weber, M. (1904). *The Protestant Ethic and the Spirit of Capitalism*. (T. Parsons, Trans.) New York: The Citadel Press

Wickens, J. R., Begg, A. J., & Arbuthnott, G. W. (1996). Dopamine reverses the depression of rat corticostriatal synapses which normally follows high-frequency stimulation of cortex in vitro. *Neuroscience*, *70*, 1–5.

Wickens, J., & Kotter, R. (1995). Cellular models of reinforcement. En: J. Houk, J. Davis, & D. Beiser (Eds.), *Models of information processing in the basal ganglia* (pp. 187–214). Cambridge, MA: MIT Press.

Williams, S. M., & Goldman-Rakic, P. S. (1993). Characterization of the dopaminergic innervation of the primate frontal cortex using a dopamine-specific antibody. *Cerebral Cortex*, *3*, 199–222.

Wise, R. A., Spindler, J., DeWit, H., & Gerber, G. J. (1978). Neuroleptic-induced

“anhedonia” in rats: Pimozide blocks reward quality of food. *Science*, 201, 262–264.

Yeung, N., & Sanfey, A.G. (2004). Independent coding of reward magnitude and *valence* in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 24, 6258-6264

Yeung, N., Holroyd, C.B., & Cohen, J.D. (2005). ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cerebral Cortex*, 15, 535–544.

## ANEXO 1: Resultados Complementarios

### Validación de estímulos y procedimiento

Antes de los registros con electroencefalograma, el paradigma experimental fue testeado a través de un estudio comportamental. 8 Participantes (5 hombres y 3 mujeres;  $M = 20$  años,  $SD = 1.3$ , con un rango de edad entre los 18-22 años) ejecutaron la tarea experimental de forma completa. Cuando el juego terminó, se les solicitó contestar un cuestionario tipo Likert, para evaluar la facilidad de comprensión de la tarea. Un segundo cuestionario de este tipo, fue administrado para evaluar el atractivo de las categorías de juego. Respecto del primer cuestionario, el 75% de los sujetos declaró haber comprendido “Muy bien” las instrucciones del juego, y el 25% restante declaró haberlas entendido “Bien”. Respecto del segundo cuestionario, la Tabla 1\_complementaria presenta los resultados obtenidos.

Tabla 1\_complementaria

Reporte de los niveles de atractivo de cada categoría de juego.

Categorías	Reportes de nivel de atractivo (%)				
	1 (mínimo)	2	3	4	5 (máximo)
AtAp	0	0	0	37,5	62,5
AtBp	0	0	37,5	50	12,5
BtAp	0	12,5	50	37,5	5
BtBp	12,5	25	37,5	25	0

**Nota:** La tabla muestra el porcentaje de respuestas que señalan cada nivel de atractivo, para cada categoría de juego.

Estos datos sugieren que las categorías de juego son atractivas. Más aun, el grado de atractivo se ve influido por la relación entre *tamaño* y *probabilidad* de recompensa, de momento que la categoría AtAp es reportada como la más atractiva, y BtBp como la menos atractiva.

El porcentaje de trials asociados a tiempos de reacción menores a 300 ms. no excede en ninguna categoría el 19%, lo que sugiere que los participantes esperan la a percibir la información de cada condición de juego antes de elegir un botón de respuesta. Los tiempos de reacción medios para cada categoría, en milisegundos, fueron: AtBp (M = 612.29, SD = 274,83); BtBp (M = 591.57, SD = 235.5); AtAp (M = 587.45, SD = 287.46); BtAp (M = 554.24, SD = 220.39). Un ANOVA de medidas repetidas mostró que las diferencias no fueron significativas,  $F(3, 21) = 2.4263$ ,  $p = 0.09403$ . Colapsando las categorías de acuerdo a su equivalencias por de *probabilidad* o *tamaño* de las

recompensas ofrecidas, se analizó el efecto de estas variables en los tiempos de reacción. Un ANOVA de medidas repetidas a dos vías, sobre *tamaño y probabilidad*, no mostró diferencias significativas asociadas al *tamaño* (At [M = 599.87 ms., SD = 271.98]; Bt [M = 572.9 ms., SD = 221.18]),  $F(1, 7) = 1.4121$ ,  $p = 0.27346$ , ni asociadas a la interacción entre *tamaño y probabilidad*,  $F(1, 7) = 0.24517$ ,  $p = 0.63566$ . Si se encontraron diferencias significativas según la *probabilidad* de recibir las recompensas positivas,  $F(1, 7) = 24.2114$ ,  $p < 0.005$ , donde el tiempo de reacción medio ante una categorías Bp (M = 601.93 ms., SD = 247.48) fue mayor que el asociado a las categorías Ap (M = 570.85 ms., SD = 248.04). Lo último sugiere un impacto de la dificultad de la tarea en los tiempos de reacción, en el sentido de que los participantes toman más tiempo en decidir una respuesta en las categorías con menos probabilidades de ganar.

Finalmente, ningún participante excedió un 60% de elecciones de uno de los dos botones de respuesta. La inexistencia de estereotipia sugiere que los participantes consideran que sus respuestas son relevantes para el resultado de cada partida.

### **Selección de electrodos para análisis de potenciales relacionados a eventos**

Siguiendo estrategias previamente reportadas para la selección de electrodos de análisis (Gehring & Willoughby, 2002), un ANOVA de medidas repetidas a dos vías, sobre *valencia* (Ganar vs. Perder) y *posición de electrodo* (19 posiciones del sistema 10-20) en torno a la ventana temporal del fERN (240-310 ms), reveló un efecto significativo de *valencia*,  $F(1, 16) = 56.3$ ,  $p < 0.001$ , y de la interacción *valencia x posición de electrodo*,  $F(18, 288) = 94.00$ ,  $p < 0.001$ . Fc y FCz se asociaron a las mayores amplitudes del fERN y a las mayores diferencias por *valencia* (Ganar menos Perder; Fz [M = -3.93, SD = 0.22 ];

FCz [M = -4.34; SD = 0.19]. Estos resultados van en la línea de lo reportado en la literatura, donde Fc y FCz son las ubicaciones canónicas para estudios sobre ERN y fERN (Holroyd *et al.*, 2003; Miltner *et al.*, 1997; Yeung & Sanfey, 2004). En consecuencia, se seleccionaron esos sitios para los análisis posteriores.

### **Análisis *peak to peak* analysis (P200 y fERN)**

La *valencia*,  $F(1, 17) = 8.7994$ ,  $p < 0.01$ , y la interacción *valencia x categoría*,  $F(3, 51) = 5.1934$ ,  $p < 0.005$ , se asociaron a diferencias estadísticamente significativas tras analizar las diferencias de amplitud peak-to-peak entre el P200 y el fERN. El test post hoc HSD de Tukey (Ms = 2.82, df = 51) mostró diferencias entre AtAp<sub>Ganar</sub> (M = 3.11  $\mu$ V, SD = 0.60) y AtAp<sub>Perder</sub> (M = 5.71  $\mu$ V, SD = 0.61),  $p < 0.001$ ; entre AtAp<sub>Ganar</sub> y BtAp<sub>Perder</sub> (M = 3.76  $\mu$ V, SD = 0.69),  $p < 0.05$ ; entre BtAp<sub>Ganar</sub> (M = 4.76  $\mu$ V, SD = 0.66) y AtAp<sub>Perder</sub>,  $p < 0.05$ ; y entre AtAp<sub>Ganar</sub> y BtBp<sub>Ganar</sub> (M = 5.24  $\mu$ V, SD = 0.70),  $p < 0.01$ .

Mientras no existió un efecto de los distintos niveles de *tamaño*, si existió un efecto de la interacción *valencia x probabilidad*,  $F(1, 17) = 13.461$ ,  $p < 0.005$ . Un test de post hoc HSD de Tukey HSD (Mse = 2.10, df = 17) destacó las diferencias entre Ap<sub>Ganar</sub> (M = 3.43  $\mu$ V, SD = 0.56) y el resto de las condiciones (Bp<sub>Perder</sub> [M = 4.94  $\mu$ V, SD = 0.63],  $p < 0.05$ , Bp<sub>Ganar</sub> [M = 4.92  $\mu$ V, SD = 0.70],  $p < 0.005$ , Ap<sub>Perder</sub> [M = 5.24  $\mu$ V, SD = 0.59],  $p < 0.005$ ).

### **Análisis de efectos de *probabilidad* y *tamaño* en ondas por diferencia en componente tipo-Pe**

Para una mejor evaluación del efecto del resultado del juego sobre la amplitud de la onda tipo-Pe, asociada a cada nivel de *probabilidad* y *tamaño*, se generaron ondas de diferencia Perder - Ganar. Un ANOVA de medidas repetidas a tres vías, sobre *electrodo* (FCz vs. Fz), *tamaño* (At vs. Bt) y *probabilidad* (Ap vs. Bp), mostró diferencias entre las

ondas de diferencia construidas en FCz ( $M = 0.76 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.39$ ) y Fz ( $M = 0.61 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.43$ ),  $F(1, 16) = 10.958$ ,  $p = 0.005$ . También se encontraron diferencias entre los dos niveles de *tamaño* en las recompensas ofrecidas, At ( $M = 2.32 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.48$ ) > Bt ( $M = 0.05 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.51$ ),  $F(1, 16) = 12.708$ ,  $p < 0.005$ . Finalmente, se encontró una tendencia similar entre las ondas de diferencia construidas para cada nivel de *probabilidad*, Ap ( $M = 1.66 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.52$ ) > Bp ( $M = 0.72 \mu\text{V}$ ,  $SD = 0.42$ ), pero dicha tendencia no fue significativa,  $F(1, 16) = 2.9891$ ,  $p = 0.10307$ .

## ANEXO 2: Código fuente “Minigarito”

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: latin1 -*-

"""Minigarito is a very crude gambling program."""

import pygame, os, random
from pygame.locals import *

##Resolucion y mapa de la pantalla
res = (1280, 800)
center = (res[0]/2, res[1]/2)

##Opciones del juego
blocks = 40          #Número de bloques
nblock = 10         #Número de trials por bloque
opwait = 2500       #Tiempo de espera para jugar
fixtime = 1000      #Tiempo de la cruz de fijación
trg = 600           #Tiempo de exposición de la ganancia
cpTime = 2000       #Tiempo de exposición de la ganancia acumulada
size = (120, 120)   #Tamaño de las cartas (en pixeles)

offer = []          #Lista de juegos ofrecidos (0 - 9 | -1 para acumulada)
offerABCD = []     #Lista de juegos ofrecidos (A, B, C, D | Z para acumulada)
total = []          #Lista de ganancias
ctotal = []        #Lista de ganancias acumuladas
times = []          #Lista de tiempos de reaccion
elapsed = []        #Lista de tiempo transcurrido
stime = []          #Lista de tiempos de presentación de ganancias
play = []           #Lista de opciones tomadas
```



```

##Diccionarios y cuadros de cartas

cards4 = {
    1: Rect((center[0] - size[0] - 5, center[1] - size[1] - 5), size),
    2: Rect((center[0] + 5, center[1] - size[1] - 5), size),
    3: Rect((center[0] - size[0] - 5, center[1] + 5), size),
    4: Rect((center[0] + 5, center[1] + 5), size)
}

cards2 = {
    1: Rect((center[0] - size[0] - 5, center[1] - size[1]/2), size),
    2: Rect((center[0] + 5, center[1] - size[1]/2), size)
}

prizebox = Rect((center[0] - size[0] / 2, center[1] - size[1] / 2), size)
allcards = cards4[1].unionall(cards4.values()[1:])

##Diccionario de ganancias

games = {
    0: [-100, -100, -100, 400], #Premio = 400, (1-p) = 0.75
    1: [-100, -100, -100, 400], #Premio = 400, (1-p) = 0.75
    2: [-100, -100, -100, 150], #Premio = 150, (1-p) = 0.75
    3: [-100, -100, -100, 150], #Premio = 150, (1-p) = 0.75
    4: [-100, 400], #Premio = 400, (1-p) = 0.5
    5: [-100, 400], #Premio = 400, (1-p) = 0.5
    6: [-100, 400], #Premio = 400, (1-p) = 0.5
    7: [-100, 150], #Premio = 150, (1-p) = 0.5
    8: [-100, 150], #Premio = 150, (1-p) = 0.5
    9: [-100, 150] #Premio = 150, (1-p) = 0.5
}

```

```
##Textos explicativos
```

```
slides = {  
  'welcome': [  
    "Bienvenido(a)",  
    "Gracias por participar de este estudio",  
    "",  
    "... de pasada puedes llegar a ganar bastante dinero"  
  ],  
  'motivation': [  
    "Instrucciones:",  
    "",  
    "Este es un juego de azar compuesto de 400 partidas individuales.",  
    "",  
    "En cada partida se presenta un conjunto de cartas,",  
    "una de las cuales es verde y expone una ganancia de $150 ode $400,",  
    "mientras que el resto son rojas y exponen una pérdida de $100.",  
    "",  
    "En cada juego tienes que elegir entre dos crupiers,",  
    "para que éste seleccione aleatoriamente una de las cartas del conjunto.",  
    "Ganarás o perderás el monto respectivo de la carta seleccionada.",  
    "",  
    "Si bien ambos crupiers seleccionan una carta de forma azarosa, la carta que  
elige el crupier",  
    "por el que te decides difiere de la que elegiría el otro si lo hubieses  
seleccionado.",  
    "Por lo mismo, para acumular una buena cantidad de dinero,",  
    "es muy importante la decisión que tomas en cada partida.",  
    "",  
    "Para que te hagas una idea: En el caso de que tuvieras la suerte de ganar en  
todas las partidas,"
```

```

    "te llevarías un monto de $110.000.",
    "",
    "Toma tu mejor decisión en cada partida!!"
  ],
  'instructions': [
    "Instrucciones (parte 2):",
    "",
    "TECLAS DE JUEGO:",
    "Botón izquierdo: el CRUPIER 1 selecciona azarosamente una de las cartas
mostradas.",
    "Botón derecho: el CRUPIER 2 selecciona azarosamente una de las mismas
cartas.",
    "",
    "IMPORTANTE:",
    "Desde el momento en que se te presentan las cartas, tienes 2,5 segundos para
tomar tu decisión.",
    "Si excedes ese plazo, de forma automática aparece una cartan naranja que
indica que pierdes $100.",
    "",
    "Cada 40 partidas se te informará cuanto dinero llevas acumulado.",
    "",
    "Suerte!"
  ],
  'farewell': [
    "El juego ha terminado y has ganado:",
    "",
    "",
    "",
    "Muchas gracias por tu colaboración!!"
  ]
]

```

```

    }

##Ordenación aleatoria de los trials y SOAs
trials = []
for i in range(blocks):
    trials.extend(random.sample(games.keys(), len(games)))
soas = []
for i in range(int(blocks * nblock)):
    soas.append(int(400 + random.random() * 600))

##Funciones:

def init():
    """Init screen attributes"""
    global font
    global char
    global screen
    pygame.init()
    iconpath = os.path.join('media', 'spiderman.png')
    icon = pygame.image.load(iconpath)
    pygame.display.set_icon(icon)
    pygame.display.set_caption("El garito de René...")
    pygame.mouse.set_visible(False)
    font = os.path.join('media', 'freesansbold.ttf')
    char = pygame.font.Font(font, 20)
    screen = pygame.display.set_mode(res, FULLSCREEN) #, FULLSCREEN

def wait():
    """Hold a bit"""

```

```

switch = True

while switch:
    for evento in pygame.event.get():
        if evento.type == KEYUP:
            if evento.key == K_SPACE:
                switch = False

def slide(text):
    """Organizes a text into a slide"""
    screen.fill(Color('white'))
    row = center[1] - 15 * len(text)
    for line in text:
        phrase = char.render(line, True, Color('black'))
        phrasebox = phrase.get_rect(centerx = center[0], top = row)
        screen.blit(phrase, phrasebox)
        row +=30

    charnext = pygame.font.Font(font, 16)
    next = charnext.render("Para continuar presiona la BARRA ESPACIADORA...",
                           True, Color('darkgray'))
    nextbox = next.get_rect(left = 6, bottom = res[1])
    screen.blit(next, nextbox)
    pygame.display.flip()
    wait()

def blackscreen(blacktime = 0):
    """I guess it's obvious"""
    screen.fill(Color('black'))
    pygame.display.flip()
    pygame.time.delay(blacktime)

```

```

def fix(wait):
    """Draws a fixation cross"""
    vertical = Rect(0, 0, 5, 50)
    vertical.center = center
    horizontal = Rect(0, 0, 50, 5)
    horizontal.center = center
    cross = vertical.union(horizontal)
    screen.fill(Color('black'), allcards)
    pygame.draw.rect(screen, Color('white'), vertical)
    pygame.draw.rect(screen, Color('white'), horizontal)
    pygame.display.update(allcards)
    pygame.time.delay(wait)
    screen.fill(Color('black'), cross)
    pygame.display.update(cross)

def prize(amount, orange = False):
    """Puts the prize on the screen"""
    if orange:
        col = Color('darkorange4')
    elif amount == -100:
        col = Color('darkred')
    else:
        col = Color('darkgreen')
    pygame.draw.rect(screen, col, prizebox)
    pygame.draw.rect(screen, Color('yellow'), prizebox, 4)
    pay = char.render(str(amount), True, Color('white'))
    paysquare = pay.get_rect(center = center)
    screen.blit(pay, paysquare)
    pygame.display.update(prizebox)
    stime.append(pygame.time.get_ticks() - start)

```

```

pygame.time.delay(trg)

def cumprize(amount, falseSOA):
    """Puts the cummulative prize on the screen"""
    if amount < 0:
        col = Color('darkred')
    else:
        col = Color('darkgreen')
    seguir = char.render("Ganancia acumulada:", True, Color('orange'))
    square = seguir.get_rect(centerx = center[0], bottom = prizebox.top - 15)
    screen.blit(seguir, square)
    pygame.draw.rect(screen, col, prizebox)
    pygame.draw.rect(screen, Color('yellow'), prizebox, 4)
    pay = char.render(str(amount), True, Color('white'))
    paysquare = pay.get_rect(center = center)
    screen.blit(pay, paysquare)
    pygame.display.update((square, prizebox))
    t1 = pygame.time.get_ticks() - start
    stime.append(t1)
    offer.append(-1)
    offerABCD.append("Z")
    soas.insert(falseSOA, 0)

    update(0, t1, 0, amount, 'show')
    pygame.time.delay(cpTime)
    screen.fill(Color('black'), square)
    pygame.display.update(square)

def update(a, b, c, d, e):
    """Updates times and winnings"""

```

```

times.append(a)
elapsed.append(b)
total.append(c)
ctotal.append(c + d)
play.append(e)

def game(payoff):
    """Let's play!"""
    offer.append(payoff)
    if payoff < 2:
        offerABCD.append("A")
    elif payoff < 4:
        offerABCD.append("B")
    elif payoff < 7:
        offerABCD.append("C")
    else:
        offerABCD.append("D")
    if payoff < 4:
        cards = cards4
    else:
        cards = cards2
    gamex = random.sample(games[payoff], len(games[payoff]))
    score = random.choice(gamex)
    for card in cards:
        if gamex[card - 1] < 0:
            col = Color('darkred')
        else:
            col = Color('darkgreen')
        pygame.draw.rect(screen, col, cards[card])
        pay = char.render(str(gamex[card - 1]), True, Color('white'))

```



```

    paysquare = pay.get_rect(center = cards[card].center)

    screen.blit(pay, paysquare)

pygame.display.update(cards.values())
## MARK: offered game type end result

switch = True

t0 = pygame.time.get_ticks()

while switch:

    now = pygame.time.get_ticks()

    t1 = now - t0

    if t1 >= opwait:

        update(t1, now - start, -100, sum(total), 'pass')

        fix(fixtime)

        prize(-100, True)

## OPMARK: game's result shown when pass [maybe put it in prize()]

    switch = False

else:

    for event in pygame.event.get():

        if event.type == KEYDOWN and event.key in (K_LEFT, K_RIGHT):

            now = pygame.time.get_ticks()

## MARK: choice made [maybe one line up... better not]

            t1 = now - t0

            if event.key == K_LEFT:

                update(t1, now - start, score, sum(total), 'left')

            elif event.key == K_RIGHT:

                update(t1, now - start, score, sum(total), 'right')

            fix(fixtime)

            prize(score)

## MARK: game's result shown [maybe put it in prize()]

    switch = False

```

```

def end(image, sound):
    """Closes the show"""
    rutapng = os.path.join('media', image)
    rutawav = os.path.join('media', sound)
    ring = pygame.image.load(rutapng)
    ringbox = ring.get_rect(center = center)
    screen.blit(ring, ringbox)
    pygame.display.update(ringbox)
    off = pygame.mixer.Sound(rutawav)
    off.play()
    while True:
        for evento in pygame.event.get():
            if evento.type == KEYUP and evento.key == K_ESCAPE:
                pygame.quit()
                return

def ends():
    """Closes the show soberly"""
    blackscreen()
    while True:
        for evento in pygame.event.get():
            if evento.type == KEYUP and evento.key == K_ESCAPE:
                pygame.quit()
                return

def save(name):
    """Well, it's obvious too"""
    path = os.path.join('data', name + '.csv')
    if not os.access(path, os.F_OK):
        f = open(path, 'w')

```

```

        f.write("Game;Play;Payoff;cumPayoff;rTime;elapsedTime;showTime;SOA;Game0-9\n")
else:
    f = open(path, 'a')
for i in range(len(total)):
    f.write("%s;%s;%d;%d;%d;%d;%d;%d;%d\n" % (offerABCD[i],play[i],
                                             total[i], cttotal[i],
                                             times[i], elapsed[i],
                                             stime[i], soas[i], offer[i]))

f.close()

def main():
    """Game's mainloop"""
    global start
    filename = raw_input("Ingrese nombre de archivo de datos: ")
    init()
    slide(slides['welcome'])
    slide(slides['motivation'])
    slide(slides['instructions'])
    blackscreen()
    count = 0
    start = pygame.time.get_ticks()
    for i in range(len(trials)):
        fix(fixtime)
## PAUSE
        pygame.event.clear()
        game(trials[i])
        blackscreen(soas[i])
        if (i + 1) % (nblock * 4) == 0:
            count += 1
            fix(fixtime)

```

```
        cumprize(sum(total), i + count)
## OPMARK: cummulative game's result shown [maybe put it in cumprize()]
    save(filename)
    slides['farewell'][2] = "$ " + str(ctotal[-1])
    slide(slides['farewell'])
    ends()

##Inicio del Experimento
if __name__ == "__main__":
    main()
```

## ANEXO 3: Carta de Consentimiento Participantes

### Carta de Consentimiento

El propósito de este estudio es realizar una investigación respecto de la toma de decisiones económicas. Para ello se le colocará una malla de electrodos, que registraran la actividad eléctrica natural del cerebro, y se le pedirá que juegue en un computador un sencillo juego de azar que se le explicará oportunamente. Siga las instrucciones específicas que aparecen en dicho monitor y las instrucciones del investigador.

Bajo ninguna circunstancia la asistencia a los experimentos implicará riesgo alguno para los participantes.

Como voluntario de este estudio declara:

- Haber aceptado voluntariamente participar en este estudio;
- Estar en conocimiento que este estudio no persigue ningún fin de lucro ni interés individual;
- Estar en conocimiento que la información recogida de este estudio es absolutamente confidencial y que sólo los investigadores responsables dispondrán de ella;
- Haber aceptado como retribución un monto equivalente, en pesos, al 50% del monto acumulado en el juego. Dicho monto en general bordeará los 10.000 pesos chilenos, pero puede variar de modo importante, a favor o en contra, dependiendo de la suerte y habilidad del participante.

Yo, \_\_\_\_\_, he leído y entendido completamente el alcance del estudio. Firmo con total consentimiento de la información antes mencionada.

Firma: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Teléfono y dirección de contacto

\_\_\_\_\_

Evaluador: \_\_\_\_\_

Proyecto: \_\_\_\_\_

Investigador Responsable: René San Martín. Vergara 275. Universidad Diego Portales.

Mail: [rene.sanmartin.ullo@gmail.com](mailto:rene.sanmartin.ullo@gmail.com), Fono: 6762540.