



Efecto del Error de Predicción y la Retroalimentación en la Respuesta Fásica Pupilar Evocada Durante Tareas de Diferente Demanda Cognitiva: Un Estudio con Eye-Tracking.

Alumno: Maximiliano Ceardi Martínez

Profesor: Tomás Ossandón Valdés

Fecha: 2 de Diciembre de 2024

Resumen:

Este estudio investigó el impacto del error de predicción y la retroalimentación en la respuesta pupilar fásica durante tareas de alta y baja demanda cognitiva. Utilizando Eye-Tracking, se analizaron las respuestas pupilares de 10 participantes en un experimento con 120 ensayos por persona, divididos en bloques de tareas con 2, 3 o 4 círculos en movimiento. Se midió el diámetro pupilar en relación con la retroalimentación positiva y negativa, así como el tiempo de reacción. Los resultados esperaron encontrar un menor diámetro pupilar en tareas de baja demanda cognitiva con retroalimentación positiva y negativa, y un mayor diámetro en tareas de alta demanda cognitiva. Además, se anticipó que el tiempo de reacción sería más corto en tareas de baja demanda cognitiva y más largo en tareas de alta demanda. Estos hallazgos ayudan a comprender cómo la atención selectiva, modulada por el control Top-Down y Bottom-Up, influye en el comportamiento adaptativo en función de la carga cognitiva.

Introducción:

Desimone y Duncan (1995) plantearon que la atención tiene capacidad y recursos limitados, donde múltiples estímulos compiten por la representación visual, controlada por mecanismos de control atencionales Bottom-Up (BU) y Top-Down (D) (Beck & Kastner (2009). El control BU es ascendente (feedforward) y responde a estímulos externos (exógenos) de manera involuntaria, automática, rápida y eficiente (Baluch & Itti, 2011). Este va desde regiones sensoriales ventrales occipito-temporales hasta regiones superiores cognitivas dorsales fronto-parietales y prefrontales. El segundo es Descendente (feedback) y va en dirección contraria, es conocido como Top-Down (TD) y responde a estímulos internos (endógenos) como las expectativas y la experiencia previa. (Noudoost et al., 2010; Engel, Fries & Singer, 2001). En este contexto, los estímulos de baja saliencia o baja relación señal-ruido tienden a suprimirse, mientras que los de alta saliencia se amplifican por el control BU (Fiebelkorn & Kastner, 2021).

En el control TD se crea una plantilla atencional que preactiva áreas neuronales asociadas al estímulo objetivo y genera hipótesis predictivas sobre su comportamiento (Duncan & Humphreys 1989), dándole una ventaja competitiva fuerte en base a la familiaridad y expectativas de comportamiento, mientras que los estímulos irrelevantes serán inhibidos (Engel, Fries & Singer, 2001). De modo que, a mayores estímulos, semejanza entre ellos o si se presentan simultáneamente, mayor será la interferencia, menor será el rendimiento y mayor el tiempo de reacción, como en tareas de alta demanda cognitiva. Mientras que, si su presentación es secuencial, son novedosos, de alta saliencia o con importancia aprendida mejor será su rendimiento, como en tareas de baja demanda cognitiva (Palva, 2018).

La organización cortical está jerárquicamente y funcionalmente estructuradas entre regiones sensorimotoras (BU) y transmodales (TD), en términos de diferenciación microestructural y conexiones (Huntenburg, 2018). Se cree que el cerebro podría operar en un punto crítico entre orden y caos, permitiendo la propagación eficiente de la actividad neuronal (O'Byrne & Jerbi, 2022; Cocchi et al., 2017). Bastos et al. (2020) señala que el cerebro procesa jerárquica y por capas la información desde regiones inferiores hasta superiores (Feedforward) y viceversa (feedback) y que estas oscilaciones neuronales regulan redes de control cognitivo de gran escala, modulando tanto el procesamiento local de señales como el intercambio comunicacional de información entre regiones, impactando la percepción y el comportamiento (Jensen et al., 2021; Sadaghiani & Kleinschmidt, 2016), además, Vinck et al. (2023) propuso que frente a errores predictivos, se produce una amplificación frecuencial no lineal de las oscilaciones ascendentes, lo que permite la actualización rápida de los modelos predictivos (Vinck et al., 2023; Schneider et al., 2021).

Siguiendo lo mismo, según Palva (2018), las predicciones sensoriomotoras se distribuyen a lo largo de múltiples escalas de tiempo que va desde milisegundos (a las que Beggs & Plenz (2003) les llamó

avalanchas neuronales) a cientos de segundos. Y, que el cerebro tiene una actividad dinámica, rítmica, oscilatoria, periódica, acoplada y sincronizada, que representa como este organiza la información y le permite anticipar, coordinar, y adaptarse a las demandas sensoriales y cognitivas. Al respecto se propuso que la actividad intrínseca en reposo es la que crea el camino de conectividad funcional que facilita el flujo de información entre regiones cerebrales (Cole et al., 2016). De modo que estas dan forma a la respuesta neuronal durante tareas de alta demanda cognitiva. Así, Bastos et al. (2020) plantea que las señales ascendentes están inhibidas ante estímulos familiares no relevantes y que se desinhiben ante errores predictivos, lo que permite la actualización de la memoria de trabajo, el aprendizaje y el comportamiento adaptativo (Bastos et al., 2020).

Engel (2001) propuso que la sincronización neuronal es esencial para la representación de objetos, la integración sensoriomotora y la atención selectiva. Destacando que en estados de atención y expectativa las oscilaciones neuronales mejoran su sincronización. La sincronización entre redes como las frontoparietales y sensoriomotoras facilitan la modulación de contextos, la planificación y la atención selectiva. (Engel, Fries & Singer, 2001; Jensen et al., 2021). **Fiebelkorn & Kastner (2021)** destacaron que la atención espacial prioriza partes específicas del entorno preparando la red atencional para procesar estímulos futuros, incluso en ausencia de estimulación sensorial directa. Lo que se traduce en una mayor tasa de disparo y sincronización neuronal durante los retrasos previo a estímulos predecibles. Mejorando la transferencia de información entre regiones cerebrales y optimizando el rendimiento atencional, reduciendo los errores y el tiempo de reacción, especialmente en tareas de alta demanda cognitiva (Sadaghiani & Kleinschmidt, 2016; Vinck et al., 2023).

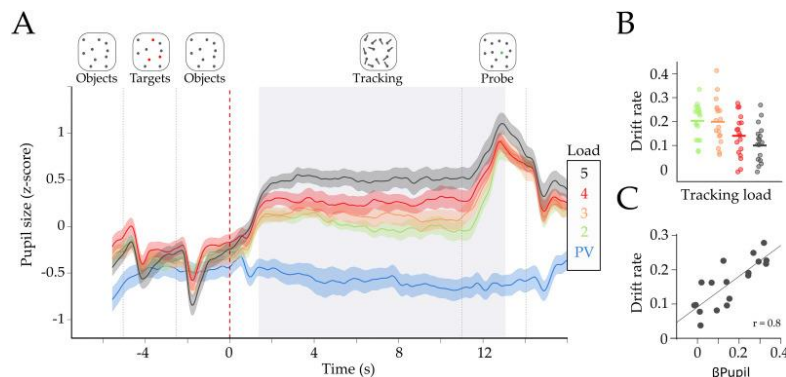
En este contexto, la dilatación pupilar se ha correlacionado con la atención selectiva y la actividad del Locus Coeruleus (LC) que regula la liberación de norepinefrina y modulando la atención según la relevancia de los estímulos (Aston-Jones et al., 2000; Usher et al., 1999). Hofmeister y Sterpenich (2015) también planteó que la actividad de las neuronas del LC es tanto tónica como fásica y que varía en función del estado de alerta, favoreciendo o desfavoreciendo el enfoque atencional y la conexión con el entorno ante tareas de baja o alta demanda cognitiva y que este aumento es correlativo con el diámetro pupilar, permitiendo al organismo estar enfocado y filtrar los estímulos irrelevantes (Usher et al., 1999; Aston-Jones y Bloom, 1981; Rajkowski et al., 1994).

Se encontró que en situaciones donde el individuo predice una mayor respuesta, la actividad del LC es mayor y que este modula la atención selectiva en función de la relevancia de los estímulos y las recompensas esperadas. Además de esto, la acetilcolina se ha relacionado con la fijación de la atención en un objetivo particular sobre todo en la corteza visual (Noudoost et al., 2010). La noradrenalina con la modulación la atención selectiva y el estado de alerta (Aston-Jones & Cohen, 2005), mientras que la Dopamina se ha asociado sobre todo a la atención sostenida, la motivación y el esfuerzo en tareas cognitivas (Aston-Jones & Cohen, 2005; Bouret & Richmond, 2015).

Por lo que, en este trabajo se procedió a comparar el efecto del error de predicción y la valencia de la retroalimentación (positiva o negativa) en tareas de alta demanda cognitiva (seguimiento de 4 círculos) versus tareas de baja demanda cognitiva (seguimiento de 2 círculos), relacionando este a un comportamiento adaptativo con una respuesta pupilar fásica evocada utilizando Eye Tracking. Como hipótesis se espera que en tareas de baja demanda cognitiva (seguimiento de 2 círculos), haya un menor diámetro pupilar en trials pasados positivamente (True_pos, False_pos) y uno menor en trials fallados negativamente en el estudio (True_neg, False_neg); Mientras que en tareas de alta demanda cognitiva se espera un mayor diámetro pupilar en trials pasados positivamente (True_pos, False_pos) y uno menor en trials fallados negativamente en la investigación (True_neg, False_neg), Finalmente, se espera encontrar un tiempo de reacción menor en tareas de baja demanda cognitiva (seguimiento de 2 círculos) y un tiempo de reacción mayor tareas de alta demanda cognitiva (seguimiento de 4 círculos) correlacionando esto por medio de análisis estadísticos de varianza (ANOVA de dos vías de medidas repetidas) y correlaciones estadísticas (coeficiente de Pearson)

Resultados: Se esperaba encontrar algo como esto:

Figura 1,



Wainstein G, Rojas-Líbano D, Medel V, Alnæs D, Kolskår KK, Endestad T, Laeng B, Ossandon T, Crossley N, Matar E, Shine JM. The ascending arousal system promotes optimal performance through mesoscale network integration in a visuospatial attentional task. *Netw Neurosci*. 2021 Nov 30;5(4):890-910. doi: 10.1162/netn_a_00205. PMID: 35024535; PMCID: PMC8746119.

Conclusiones:

En conclusión, los resultados de este estudio sugieren que tanto el diámetro pupilar como el tiempo de reacción se ven influenciados por el error de predicción y la retroalimentación, dependiendo de la demanda cognitiva de las tareas. En tareas de baja demanda cognitiva, el diámetro pupilar fue menor en respuestas correctas y el tiempo de reacción más corto. En tareas de alta demanda cognitiva, el diámetro pupilar fue mayor en respuestas correctas y el tiempo de reacción más largo. Estos hallazgos respaldan la idea de que la atención, el comportamiento adaptativo y las respuestas pupilares se modulan por la retroalimentación y la carga cognitiva.

Materiales y métodos:

Dispositivo usado:

Se adquirió datos por medio de un dispositivo de seguimiento ocular EyeLink 1000 Plus, versión II CL v5.50 (juni 2022), y se almacenaron en formato EDF (Eye Data File), convertidos y etiquetados con el software edfapi 4.4.1, y el componente EyeLink Dataviewer Subcomponent, con ayuda de una cámara EyeLink GL Version 1.2 con un sensor AI7.

participantes:

primeramente, se puso a las 21 participantes mujeres entre 19 y 24 años de edad a las que previamente se les hizo un pequeño cuestionario para llevar un registro y descartar alguna condición atencional especial o médica. De los cuales 10 fueron finalmente usados para el grupo experimental y los análisis estadísticos y correlacionales.

Diseño experimental:

se realizaron 4 bloques con 30 ensayos cada uno, para un total de 120 ensayos por participante. En cada ensayo se presentaron 8 círculos de color plano definido como (-1,-1,0) que luego cambian

brevemente a un color distintivo (-1,-0,7,-1), dependiendo del bloque se pintan 2, 3 o 4 círculos de forma aleatoria.

En una silla, sentado y con respaldo de mentón y un Eye tracker, frente a una ventana de 1920x1080 pixeles con un fondo gris oscuro (-0,6, -0,6, -0,6) se procedió al experimento. Primeramente, se puso en medio de la pantalla una cruz de fijación de 0,4 unidades de durante 2,5 a 5 segundos de preparación, posteriormente los 8 círculos de radio 0,16 unidades se desplazan a una velocidad de 1.5 unidades/segundo por 7 segundos, luego se detienen a los 18 segundos, se espera 0,5 segundos y se pregunta a los participantes si el círculo seleccionado era uno de los objetivos iniciales o no con respuestas booleanas, después de la respuesta se le da una retroalimentación (correcto o incorrecto), esto en un tiempo de máximo 21 segundos, donde se les 2,5 segundos para procesar la información, finalmente, los participantes observaban una cruz de descanso en el centro de la pantalla por 20 segundos. Se realizó un protocolo de 120 ensayos por participante dividido en 30 ensayos por bloque donde se variaba el número de círculos pintados.

Códigos utilizados:

Se usó un sistema de representación de eventos por medio de códigos numéricos marcando el inicio del ensayo (10), inicio del movimiento (11), inicio de la pregunta (12) e inicio del descanso (80). Junto con esto se grabaron las respuestas del participante: verdadero positivo (101), verdadero negativo (102), falso positivo (103), falso negativo (104).

Script utilizado:

Se realizaron dos scripts para los datos de ET .acs y para los datos de conducta .csv. El primer script procesa archivos de EyeLink de múltiples sujetos, limpiando y filtrando los datos para eliminar artefactos, como sacadas, e interpolando parpadeos erróneos con MNE. Los datos de diámetro pupilar de los canales izquierdo o derecho son filtrados, y los resultados limpios se guardan en un nuevo archivo. Finalmente, se visualizan los datos procesados en un gráfico para cada sujeto, sin sobrescribir los archivos originales.

El segundo script carga archivos CSV con respuestas de sujetos, separando los datos por bloques y tipos de respuestas. Extrae los tiempos de reacción según el tipo de respuesta y los organiza en listas. Luego, grafica la distribución de los tiempos de reacción de respuestas "True Positive", "True Negative", "False Positive" y "False Negative" en un histograma para su análisis visual.

Script en Git-hub: https://github.com/macm-1/Eye_tracker.git

Bibliografia:

- **Desimone, R., & Duncan, J.** (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193-222.
- **Beck, D. M.** (2009). Attention in the brain: Insights from functional neuroimaging. *Behavioral and Brain Sciences*, 32(6), 613-622.
- **Baluch, F., & Itti, L.** (2011). Mechanisms of top-down attention. *Vision Research*, 51(13), 3279-3308.
- **Beck, D. M., & Kastner, S.** (2009). Top-down control of the fronto-parietal attention network. In: *Progress in Brain Research*, 174, 147-157.
- **Noudoost, B., et al.** (2010). Control of visual attention by the prefrontal cortex. *Frontiers in Psychology*, 1, 18.
- **Engel, A. K., Fries, P., & Singer, W.** (2001). Dynamic predictions: Oscillations and synchrony in top-down processing. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(10), 704-716.
- **Duncan, J., & Humphreys, G. W.** (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96(3), 433-458.
- **Palva, S., & Palva, J. M.** (2018). Role of brain oscillations in visual attention. *Frontiers in Psychology*, 9, 1139.
- **Huntenburg, J. M.** (2018). The organization of the human brain in functional networks. *Neuroimage*, 185, 267-276.
- **O'Byrne, J., & Jerbi, K.** (2022). Critical brain dynamics in cognition and learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(7), 561-573.
- **Cole, M. W., et al.** (2016). Intrinsic and task-evoked brain network dynamics and their implications for cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(4), 274-290.
- **Jensen, O., et al.** (2021). Oscillatory brain networks and cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 718.
- **Sadaghiani, S., & Kleinschmidt, A.** (2016). Brain networks and the control of cognitive states. *Current Opinion in Neurobiology*, 40, 111-117.
- **Vinck, M., et al.** (2023). Communication through coherence: Exploring brain networks with oscillations. *Nature Neuroscience*, 26(2), 118-128.
- **Schneider, S., et al.** (2021). Oscillatory rhythms and error prediction in the brain. *Journal of Neuroscience*, 41(5), 973-985.
- **Bastos, A. M., et al.** (2020). The hierarchical nature of predictive coding in the brain. *Frontiers in Psychology*, 11, 2267.
- **Fiebelkorn, I. C., & Kastner, S.** (2021). A dynamical systems perspective on attention and memory. *Neuron*, 109(6), 1011-1027.
- **Beggs, J. M., & Plenz, D.** (2003). Neuronal avalanches in neocortical circuits. *Journal of Neuroscience*, 23(35), 11167-11177.
- **Hofmeister, J., & Sterpenich, V.** (2015). Pupillary responses and attention: Implications for neurocognitive processes. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 553.
- **Aston-Jones, G., et al.** (2000). The locus coeruleus and noradrenergic modulation of cognitive function. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(9), 391-398.
- **Usher, M., et al.** (1999). The role of norepinephrine in cognition. *Psychological Science*, 10(6), 456-463.
- **Aston-Jones, G., & Cohen, J. D.** (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 403-450.
- **Bouret, S., & Richmond, B. J.** (2015). Sensory modulation of decision making in the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(5), 297-307.

- **Saper, C. B., & Lowell, B. B.** (2014). The hypothalamic regulation of energy balance. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(10), 519-529.
- **Corbetta, M., et al.** (2008). Cerebral mechanisms of visual attention. *Journal of Neuroscience*, 28(25), 6432-6440.
- **Noudoost, B., et al.** (2010). Acetylcholine and the control of attention. *Neuron*, 67(2), 169-179.
- **Bouret, S., & Richmond, B. J.** (2015). Focusing on the role of norepinephrine in reward-guided decision-making. *Frontiers in Neuroscience*, 9, 24.