

Aprendiendo de Nuestro Cerebro Cómo Aprender

Lilia Mestas Hernández

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México,
México D.F., México.

Fernando Gordillo León

Departamento de Psicología, Facultad de
Salud, Universidad Camilo José Cela.
Madrid, España.

Correspondencia: Lilia Mestas Hernández.
Facultad de Estudios Superiores Zaragoza,
Universidad Nacional Autónoma de México,
México D.F., México. Correo electrónico:
lilia_mestas@yahoo.com.mx

Agradecimiento: Trabajo financiado por
PAPIME Proyecto PE301221, Universidad
Nacional Autónoma México.

Resumen

En las últimas décadas las tecnologías aplicadas al ámbito educativo han permitido incrementar la motivación y el rendimiento académico de los alumnos. Sin embargo, hasta la fecha no queda claro cómo los procedimientos utilizados han permitido estas mejoras, porque no se han analizado en profundidad sus efectos sobre el procesamiento de la información. Recientes investigaciones informan que estos efectos podrían explicarse porque las estrategias utilizadas simularían y, por lo tanto, facilitarían el propio funcionamiento del cerebro. En esta revisión narrativa se profundiza en este punto, en paradigmas concretos como los mapas conceptuales, la repetición, el aprendizaje basado en problemas y la realidad aumentada. En todos ellos se observa que los beneficios sobre el aprendizaje derivan de una superposición de funciones; es decir, de una "imitación" en los procesos educativos del funcionamiento de las estructuras cerebrales que procesan la información, que en último término potencian las conexiones sinápticas incrementando los niveles de neurotransmisores como la dopamina y la acetilcolina, y favoreciendo los procesos de almacenamiento de la información. Se debería profundizar en todos estos aspectos con el objetivo de crear un modelo educativo que favorezca el rendimiento de los alumnos a través de la simbiosis funcional entre educación y neuropsicología.

Palabras clave: Aprendizaje, educación, mapas conceptuales, memoria, motivación, realidad aumentada.

Learning From Our Brain How to Learn

Abstract

In recent decades, technologies applied to the educational field have made it possible to increase the motivation and academic performance of students. However, to date it is not clear how the procedures used have allowed these improvements, because their effects on information processing have not been deeply analyzed. Recent research reports that these effects could be explained because the strategies used would simulate and therefore facilitate the brain's own functioning. This narrative review delves into this point, in concrete paradigms such as concept maps, repetition, problem-based learning and augmented reality. In all of them it is observed that the benefits on learning derive from an overlapping of functions; that is, of an "imitation" in the educational processes of the functioning of the brain structures that process information, which ultimately enhance synaptic connections by increasing the levels of neurotransmitters such as dopamine and acetylcholine and improving information storage processes. All these aspects should be deepened to create an educational model that benefits student performance through the functional symbiosis between education and neuropsychology.

Keywords: learning, education, concept maps, memory, motivation, augmented reality.

Introducción

El aprendizaje es un fenómeno neurológico que surge a partir de cambios moleculares y celulares en el cerebro (Owens y Tanner, 2017), necesarios y suficientes para la formación de las memorias (Takeuchi et al.,

2014). Durante la maduración cerebral se llevan a cabo diferentes procesos neurobiológicos que tienen una gran repercusión en el ámbito educativo, en tanto el incremento de conexiones que se producen durante las primeras etapas del desarrollo no tienen una finalidad concreta. Será la interacción del niño con el ambiente la que determinará qué conexiones (cantidad y calidad) se mantienen y cuáles se eliminan (*pruning*) (Wong y Lichtman, 2003). La progresión de estos cambios durante el desarrollo del niño refleja un proceso normal, siendo una variable objetiva del funcionamiento cerebral durante el periodo escolar que permite determinar la fase del desarrollo en la que se encuentra el niño, así como la presencia de posibles patologías que estuvieran interfiriendo en su desarrollo educativo. En este proceso hablamos de *periodos críticos* como proceso natural de arborización dendrítica que sucede en los primeros años de vida y durante el periodo prenatal, más orientados a los procesos sensoriales, y que permiten a los niños adquirir las capacidades de interacción básicas con el entorno (Hübener y Bohoeffer, 2014). Son tan importantes que, de no desarrollarse adecuadamente o interrumpirse, pueden generar la pérdida básica de las capacidades sensoriales. Por otro lado, los *periodos sensibles* implican un momento en el desarrollo donde el cerebro está más orientado al cambio, y donde factores como las oportunidades ambientales y la motivación serán claves para promover nuevas conexiones neuronales. Se darán a lo largo de toda la vida con mayor prevalencia en la etapa infantil (Reh et al., 2020). Por lo tanto, la enseñanza debe entenderse en interacción con el contexto de aprendizaje, como un instrumento de "poda neuronal" que condiciona el futuro del estudiante. Debemos

preguntarnos qué factores de las nuevas propuestas educativas, surgidas en las últimas décadas, estarían facilitando en mayor grado los procesos cerebrales que permiten la conexión entre las neuronas, y que determinan en último término el mantenimiento y actualización de la información. Quizá este sea uno de los retos más importantes a los que se enfrenta la denominada Neurociencia Educativa, que surgió a principios de los años 90, bajo el nombre de *“aprendizaje basado en el cerebro”*, con el objetivo de encontrar un espacio de convergencia entre neurociencia y educación (Zadina, 2015).

¿Cómo funciona un cerebro que aprende?

Nuestro cerebro procesa información seleccionando aquella que sea más relevante para el sujeto. Esta simple definición de su funcionamiento ya nos advierte de que la relevancia del objeto a procesar resulta fundamental porque estará relacionada con la cantidad de atención y motivación que el sujeto invierta. Atención y motivación son dos de los factores que median entre las nuevas tecnologías educativas y la eficacia de los procesos cognitivos. Estos procesos psicológicos se relacionan con los niveles de determinados neurotransmisores que permiten la conectividad entre neuronas y, por lo tanto, la plasticidad neuronal. En concreto, la dopamina se ha relacionado con la recompensa o su anticipación, mientras que la acetilcolina (ACh) con los procesos novedosos o sorprendidos (Schultz y Dickinson, 2000). Precisamente estos neurotransmisores están en la base explicativa de los procesos motivacionales y atencionales necesarios para el aprendizaje (alumno motivado y atento). En este sentido, se ha comprobado que, cuando se inhibe la

presencia de estos neurotransmisores en el espacio sináptico se perjudica la plasticidad neuronal, mientras que lo contrario la favorece (Froemke et al., 2013; Reed et al., 2011; Takeuchi et al., 2014).

Sin embargo, la cuestión no es tan fácil, ya que nuestro cerebro tiene un sistema de funcionamiento que busca el equilibrio; esto supone que se requiere un nivel determinado de activación para obtener un rendimiento óptimo de los procesos cognitivos (atención, memoria). Este principio queda claramente establecido en la ley de Yerkes-Dodson (Yerkes y Dodson, 1908), donde se plantea que el rendimiento aumenta con la activación fisiológica o mental pero solo hasta un nivel determinado. Esta ley queda representada gráficamente con una U invertida, donde el nivel más alto representaría el punto óptimo de activación asociado al mayor rendimiento. A la izquierda o derecha de este punto, el rendimiento sería menor. Volviendo al ámbito educativo, esto quiere decir que una excesiva activación podría perjudicar el rendimiento del alumno tanto como una baja activación. Estaríamos hablando de los niveles de activación emocional anormales, derivados del estrés y la ansiedad, que se han relacionado con un exceso de cortisol, una hormona que ha mostrado un efecto negativo sobre el hipocampo y la consolidación de las memorias explícitas, tanto en animales como en humanos (Lupien y McEwen, 1997) y que se incrementa durante los periodos de estrés. De esta forma se perjudicaría el fortalecimiento de las conexiones entre las neuronas (de Kloet et al., 1999). El estrés continuado puede incluso generar la reducción del volumen de determinadas estructuras, algunas muy relevantes para el aprendizaje como el hipocampo (Kim et al., 2015). Sin embargo, y por suerte, este proceso es reversible una

vez los niveles de cortisol vuelvan a la normalidad.

Hemos vistos neurotransmisores y hormonas que se requieren para el adecuado funcionamiento del cerebro y de las funciones cognitivas que soportan. Sin embargo, en la base del aprendizaje, como ya hemos dicho, está la creación de nuevas conexiones neuronales o la modificación de las ya existentes. El cerebro las crea alterando las conexiones sinápticas entre neuronas de manera específica, y almacenando la información como un conjunto conectado de neuronas que posteriormente se recuperan mediante la reactivación de estos circuitos durante la evocación del recuerdo almacenado (Owens y Tanner, 2017). El proceso a partir del cual la memoria a corto plazo (MCP) se transforma en memoria a largo plazo (MLP) se denomina consolidación, y requiere cambios moleculares, celulares y estructurales, que se extiende durante periodos que pueden ser de horas, días, meses, incluso años. Este proceso requiere de la síntesis de proteínas y ARN (Davis y Squire, 1984), donde estaría implicada la activación del ciclo de CREB relacionado con la consolidación de las memorias. Cuando el proceso ha concluido se puede decir que la información se ha consolidado (Stern y Alberini, 2013).

Por otro lado, el proceso de recuperación permite evocar la memoria que ha sido consolidada, pero una vez que se deja de evocar se inicia un nuevo proceso de consolidación (reconsolidación) cuya función todavía está en debate más allá del efecto de fortalecimiento de la memoria. Uno de los aspectos más interesantes de este proceso de reconsolidación es que el recuerdo evocado se vuelve susceptible de modificarse con la información actual; es

decir, cada vez que evocamos un recuerdo cabe la posibilidad de que lo modifiquemos con información del presente. Es una especie de “actualización” de la información, como si limpiáramos el polvo de nuestros recuerdos. Una imagen mental nos ayudará. Imaginemos un sello de caucho impregnado de tinta en su base, que estampamos con fuerza sobre una hoja en blanco. Al levantarlo habremos dibujado la forma del sello en la hoja. Esto representaría el proceso de codificación. Sin embargo, la información no quedará impresa de manera definitiva hasta que no pase el tiempo necesario para que la tinta se seque en la hoja en blanco (consolidación). Hasta que eso pase, la información impresa en la hoja es susceptible de modificarse, simplemente pasando el dedo por encima. Sin embargo, una vez que la tinta se ha secado, la información ha quedado almacenada. Ahora bien, cada vez que evoquemos esa información, la tinta se volverá fresca de nuevo (reconsolidación), pudiendo ser modificada por la información del presente. Este es el proceso por el que pasan todas las memorias y que tendría un alto valor adaptativo, al actualizar la información del pasado con el presente.

Con esta breve aproximación ya conocemos de manera muy esquemática el funcionamiento de nuestra memoria, que es el destino de todo lo que aprendemos. Desde el inicio de este artículo hemos sugerido que la imitación del funcionamiento de nuestro cerebro podría darnos algunas ventajas en el aprendizaje. Pero ¿cómo podemos imitarle? En primer lugar, simulando la forma en la que la información se almacena; es decir, en un conjunto de neuronas conectadas entre sí, cuya reactivación generará la evocación del recuerdo. Algunos paradigmas del

aprendizaje, como los mapas conceptuales que simulan este sistema a través de “redes” de conceptos interconectadas entre sí. También debemos atender al funcionamiento de la memoria operativa (MO) y los métodos que utiliza para pasar la información a la MLP. Procesos como la repetición y la elaboración son fundamentales para que esto ocurra y la base del funcionamiento de la MO en su proceso de creación de agrupaciones de información (*chunks*). También hemos hablado de lo importante que es la atención y la motivación para incrementar el rendimiento de los alumnos, y paradigmas como el aprendizaje basado en problemas (ABP) y la realidad aumentada (RA), precisamente se basan en el incremento de la atención y la motivación en el alumno. Sobre todos estos paradigmas, trabajaremos en los siguientes puntos, siendo más precisos a la hora de entender sus efectos sobre las estructuras cerebrales que soportan su funcionalidad.

- Mapas conceptuales

Los mapas conceptuales son diagramas que permiten representar el conocimiento de manera estructurada. Su utilidad para el aprendizaje se basa en la idea de que las personas aprenden utilizando sus conocimientos previos. Bajo esta premisa, el aprendizaje como la integración de nuevos conocimientos, se produce al relacionar este nuevo conocimiento a los que ya se han adquirido (Ausubel 1968, 2000; Novak y Gowin, 1984). Los mapas conceptuales no solo contienen conceptos, también relaciones entre ellos en forma de líneas que vienen descritas por palabras de unión (*linking words*). En primer lugar, deberíamos hacer una distinción entre los diferentes tipos de mapas conceptuales: el mapa mental (*mind mapping*) permitiría imaginar y

explorar relaciones entre conceptos. El mapa de conceptos (*concept mapping*) permite comprender las relaciones entre los conceptos, comprendiéndolos y entendiendo el dominio al que pertenecen y el mapa de argumentos (*argument mapping*) permite comprender mejor las relaciones inferenciales entre proposiciones y evaluarlas en términos de validez de la estructura y solidez de las premisas del argumento (Davies, 2012). Un mapa conceptual estará bien hecho cuando tenga una buena estructura jerárquica y permita encontrar relaciones entre conceptos en diferentes dominios del mapa conceptual (*Cross-links*) (Novak y Cañas, 2006). Por lo tanto, se consideran estrategias activas de aprendizaje que permiten crear estructuras significativas de conocimiento (Karpicke y Blunt, 2011). La utilización de mapas conceptuales en el ámbito educativo se ha mostrado efectiva para mejorar la comprensión (Kinchin, 2011), el desarrollo de las habilidades del pensamiento de orden superior (Cañas et al., 2017), los logros académicos y la motivación del estudiante (Karakuyu, 2010; Schaal, 2010).

Estos esquemas que ayudan al aprendizaje son congruentes con la idea que se ha evidenciado en recientes investigaciones dentro del ámbito de la neurociencia y la neuropsicología, y es el hecho de que los diseños complejos que han elaborado los seres humanos, sobre todo dentro del ámbito de la alta tecnología, son sorprendentemente similares al propio funcionamiento y diseño del cerebro humano (Goldberg, 2001). Por lo tanto, se podría decir que la simulación en las tareas de aprendizaje del funcionamiento de nuestro cerebro podría facilitar dicho aprendizaje; sin embargo, todavía no hay suficiente respaldo científico respecto a los beneficios de los

mapas conceptuales sobre el aprendizaje en comparación a otro tipo de estrategias (Nesbit y Adescope, 2006), por ejemplo, el estudio tradicional (Karpicke, 2017). Por otro lado, otra técnica que sí está recibiendo mayor respaldo científico es la recuperación repetida, también llamada aprendizaje basado en la recuperación o efecto test (Salmerón, 2011), que consiste en recuperar (evocar) varias veces el material estudiado (i.e., hacerse un examen, recuperar la información de manera escrita o verbal). Un reciente estudio analizando ambas técnicas, concluyó que los mapas conceptuales aplicados en un primer momento en el proceso de aprendizaje, como actividad de recuerdo repetido, podría organizar el recuerdo de la información, facilitando su codificación y recuperación (Ortega-Tudela et al., 2019). En esta investigación se aplicaron las estrategias de mapas conceptuales y la recuperación repetida en diferentes grupos variando el orden, siendo el orden en el que se aplicaba primero mapas conceptuales el que mayor beneficio sobre el aprendizaje generó. Sin duda estos resultados no son ajenos al funcionamiento básico de nuestra memoria a través de los esquemas mentales.

Autores clásicos como Bartlett (1932), ya advertían de la dificultad de desvincular el conocimiento previo de los procesos de aprendizaje, planteando la existencia de esquemas mentales que guiarían los procesos de aprendizaje, facilitando la codificación y la recuperación de la información. Por ejemplo, todos sabemos cómo se produce de manera habitual un atraco en una joyería, incluso sin haber sido víctimas de este suceso, nuestra experiencia previa a través de las películas, noticias, o lo que nos cuentan personas que sí lo han sufrido, ha permitido que tengamos un

esquema vacío de contenido respecto a lo que es un atraco (habitualmente hombre, encapuchado, con un arma y un coche esperando fuera). Este esquema nos permitiría codificar la información de manera más eficaz si en alguna ocasión nos enfrentáramos a una situación de este tipo. No podemos evitar trasladar estas ventajas a los esquemas que podemos crear a través de los mapas conceptuales, pero además podemos pensar igualmente que las conductas de aprendizaje son comparables a las “*conductas cerebrales*”, beneficiando al propio aprendizaje. Estas “*conductas cerebrales*” tienen que ver con la fisiología cerebral, que explora cómo las neuronas se relacionan entre sí para generar un conocimiento perdurable en el tiempo.

Ahora bien, ¿cómo puede explicar la neuropsicología el efecto beneficioso de los mapas conceptuales en el aprendizaje? Teniendo en cuenta que los recuerdos se codifican y almacenan en redes sinápticas, y que se recuperan al activarse algunas de las conexiones neurales, cuanto mayor sea el número de conexiones neuronales mayor probabilidad habrá de recuperar el recuerdo almacenado. Por esta razón, cuando los alumnos utilizan los mapas mentales relacionando conceptos de diferentes ámbitos, estarían simulando y facilitando el funcionamiento del cerebro en el momento de codificar, almacenar y recuperar la información. Además, los estudiantes pueden potenciar el efecto de los mapas mentales junto a otro tipo de estrategias educativas, que se pueden implementar en clase por los profesores y que incluirían evaluaciones previas y actividades que permitan comparar, sintetizar y evaluar la información que han relacionado en el mapa conceptual (Davis y Squire, 1984).

Este planteamiento es congruente con recientes estudios de resonancia magnética funcional (RMf), donde se ha registrado la actividad cerebral durante la lectura de una historia para analizar cómo se representan corticalmente las categorías y las relaciones semánticas. Se encontró que las categorías semánticas estaban representadas por patrones corticales distribuidos y superpuestos en áreas principalmente multimodales, siendo el hemisferio izquierdo más selectivo para conceptos concretos y el derecho para conceptos abstractos. La forma en la que se relacionaban las categorías semánticas tenía que ver con la activación y desactivación simultánea de distintas redes corticales. Por lo tanto, para la realización de inferencias y el razonamiento conceptual, el cerebro utilizaría redes corticales distribuidas para codificar conceptos y las relaciones entre dichos conceptos (Zhang et al., 2020).

Las memorias son interdependientes (memorias sensoriales, MCP y MLP). Para que la información entrante se almacene adecuadamente en la MLP debe pasar previamente por la MCP, que tiene capacidad limitada, pero que puede agrupar la información en unidades que llegan a contener gran cantidad de información (*Chucks*). Sin embargo, el número de agrupaciones que puede soportar la MCP, ahora memoria operativa o de trabajo (MO), está limitado a 4 ó 5 unidades. Por lo tanto, se requiere una secuencia ordenada de interacciones entre la memoria operativa, que recibe información nueva del exterior, y la MLP que contiene el conocimiento almacenado (Anderson, 1992). Seguramente los mapas conceptuales sean tan eficaces porque facilitan el proceso de integración que debe hacer la memoria operativa. Hay que tener en cuenta, además,

que la capacidad de la memoria operativa está asociada al procesamiento consciente de la información que está dentro de su foco atencional, y su capacidad de procesamiento estaría limitada cuando se trata de información novedosa (Baddeley, 1986; Cowan, 2001; Miller, 1956). Por esta razón, el conocimiento previo del alumno a la hora de enfrentarse al aprendizaje de una información es fundamental porque permitiría reducir la limitación de procesamiento de la memoria operativa, facilitando la agrupación de la información novedosa con la almacenada y relacionada previamente con la anterior. Otra forma de reducir la limitación de la memoria operativa es la de automatizar procedimientos básicos. Por lo tanto, tener en cuenta los niveles de experiencia del alumno y automatizar los procesos básicos resulta fundamental en el aprendizaje (Kalyuga, 2013) y es algo que se puede conseguir en parte con los mapas conceptuales

La repetición y elaboración de la información

La repetición, el refresco y la elaboración de la información son procesos cognitivos que permiten mantener la información activa en la MO, facilitando que la información pase a la MLP. Por un lado, la repetición (ensayo articulatorio) sería un mecanismo especializado para el dominio verbal (Baddeley, 1986). Mientras que el refresco estaría relacionado con la focalización atencional de las representaciones presentes en la MO (pensar brevemente en un estímulo después de que ya no está físicamente presente). Por su parte, la elaboración relaciona estas representaciones con redes semánticas ya existentes (Bartsch et al., 2018). El efecto positivo de la repetición y la práctica distribuida sobre la memoria fue observado

por primera vez por autores como Ebbinghaus (1885/1913). Sin embargo, no son muchos los estudios que han analizado el efecto del aprendizaje por repetición sobre el sustrato neuronal implicado en el aprendizaje. Algunos estudios utilizando técnicas de neuroimagen, como la tomografía por emisión de positrones (*Positron Emission Tomography*, [PET]), han evidenciado que después de que las palabras se repitieron cuatro veces en la fase de aprendizaje, su recuerdo posterior (evocación) generó una mayor activación en el hipocampo anterior izquierdo (Heckers et al., 2002). Sin embargo, otros estudios con imágenes y tareas de reconocimiento observaron que durante la recuperación la activación del hipocampo era más débil cuando el aprendizaje había sido con varias rondas de repetición respecto a cuando solo se aplicó una vez (Reagh et al., 2017). La incongruencia entre los resultados puede deberse a los diferentes procesos y estímulos involucrados (recuerdo libre vs. reconocimiento; palabras vs. imágenes), lo que advertiría de la complejidad de los efectos de la repetición sobre la memoria. Otra cuestión importante es el hecho de que el rendimiento decae más lentamente después de un aprendizaje por repetición (vs. una sola vez) (i.e., Ebbinghaus, 1885/1913; Yang et al., 2016).

Por otro lado, diferentes estudios han confirmado la conectividad entre el hipocampo y regiones neocorticales durante la recuperación explícita cuando los estímulos se aprenden una vez (Maguire, 2001); sin embargo, esta relación puede variar cuando los estímulos se han codificado por repetición, observándose un menor control de las regiones prefrontales (Kompus et al., 2009) y un mayor procesamiento perceptivo, relacionado con

los estímulos (Zhan et al., 2018). En la actualidad, diferentes investigaciones han demostrado que la repetición mejora en algún grado la memoria, la resolución de problemas y la generalización de la información a nuevas situaciones, mejorando, por lo tanto, la eficacia y eficiencia del aprendizaje (Dunlosky et al., 2013; Kang, 2016). Por otra parte, algunas investigaciones han encontrado que la repetición no mejora la memoria a largo plazo, pero sí lo hace la elaboración de la información (Bartsch et al., 2018).

Respecto a la elaboración de la información, algunas investigaciones informan que la codificación elaborada de la información generaba una huella de memoria más rica, pero que solo beneficiaba el reconocimiento si se podía reestablecer el contexto de codificación original (Fisher y Craik, 1980). Este efecto de restablecimiento del contexto (RC), se puede explicar a partir del principio de especificidad (Tulving y Thomson, 1973), que plantea que la nueva memoria se codifica junto a una red que integra la información disponible en el momento de la codificación, que formaría señales de recuperación entre sí. Este efecto se ha evidenciado en la memoria verbal (i.e., Campeanu et al., 2015), memoria de reconocimiento (i.e. Hockley, 2008; Hockley et al., 2012), memoria de testigos (i.e., Dando et al., 2009; Hammond et al., 2006; Wong y Read, 2011), memoria episódica (i.e., Bramão et al., 2017), reconocimiento de caras (i.e., Davies y Milne, 1985; Wong y Read, 2011). Por lo tanto, la elaboración de la huella junto al restablecimiento del contexto de codificación podría beneficiar a la memoria y el aprendizaje.

El aprendizaje basado en problemas (ABP) supuso un cambio de enfoque en el proceso de aprendizaje, donde la elaboración de la

información aprendida se potencia dando un papel activo a los alumnos que buscaban la relación entre la información. La perspectiva tradicional presenta la información en un primer momento y, posteriormente, busca su aplicación a través de la resolución de problemas. Sin embargo, con el ABP el camino es el inverso, primero se presenta el problema, se focaliza en las necesidades de aprendizaje, se busca información y se regresa al problema. Este tipo de aprendizaje permite un papel más activo del alumno en el proceso de aprendizaje. De esta forma los alumnos aprenden a relacionar información, son más autónomos y asumen responsabilidades, están más motivados y activos, y se fomenta la creatividad, el razonamiento y el pensamiento crítico. Todo esto sumado al uso de las nuevas tecnologías favorecería el rendimiento de los alumnos (Bara y Xhomara, 2020). La motivación y la atención podrían explicar estos beneficios sobre el rendimiento académico. En concreto, este tipo de aprendizaje se ha relacionado con el incremento de dopamina y acetilcolina, neurotransmisores relacionados con la formación de nuevas sinapsis (Owens y Tanner, 2017). Se ha encontrado que los alumnos que intervienen en este tipo de metodologías didácticas inductivas mejoran su rendimiento académico, incluso cuando son aplicadas por profesores inexpertos (Deslauriers et al., 2011; Freeman et al., 2014). Esto podría explicarse, a nivel neurocientífico y en concreto respecto a la memoria episódica, porque una de las características básicas de este tipo de memoria es la de codificar asociaciones entre diferentes características del episodio, de forma que el recuerdo será más fácil evocarlos cuando proviene de una red de asociaciones muy elaborada (i.e., voy a recordar mejor lo que desayuné el lunes de

la semana pasada si ese día paso algo relevante en las noticias, que veía mientras desayunaba, o sucedió algo que se salía de la rutina). Por lo tanto, las metodologías didácticas inductivas (i.e., aprendizaje basado en problemas), incrementarían la red de asociaciones acontecidas durante los episodios de aprendizaje mejorando el recuerdo de dicho aprendizaje y, por lo tanto, el rendimiento académico (Markant et al., 2016). Además, en esta mayor elaboración de la información está presente la participación de la memoria operativa. Esta memoria es el conjunto de mecanismos cognitivos utilizados para recuperar, manipular y mantener la información durante el procesamiento (Baddeley, 1986, 1990). La MO juega un importante papel en diferentes tipos de resolución de problemas, en tanto la capacidad para mantener la información activa a través del control atencional, facilita integrar la información de los distintos pasos necesarios para solucionar un problema (Solaz-Portolés y Sanjosé-López, 2009). Mediante estudios con técnicas de electroencefalografía (EEG), se ha observado un menor rendimiento de la MO en alumnos con bajo rendimiento académico respecto a los de alto rendimiento académico (Aguirre-Pérez et al., 2007). Por otro lado, algunos estudios longitudinales con población infantil (media edad, 13,1 años), mostraron que la memoria de trabajo se relacionaba débilmente con el rendimiento académico, además de evidenciar una capacidad pobre para predecir variaciones en el rendimiento académico durante un periodo de tres años (Dubuc et al., 2020). Estos resultados nos advierten de que la relación entre MO y rendimiento académico depende de la maduración de las estructuras implicadas en la MO, como son las regiones prefrontales dorsolaterales.

- Realidad aumentada y educación

La implementación de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) en entornos educativos originó lo que se conoce como las TAC que son las tecnologías del aprendizaje y del conocimiento. Las TAC tratan de orientar hacia usos más formativos, tanto para el estudiante como para el profesor, con el objetivo de aprender más y mejor. Se trata de incidir especialmente en la metodología, en los usos de la tecnología y no únicamente en asegurar el dominio de una serie de herramientas informáticas, es decir, se trata de conocer y de explorar los posibles usos didácticos que las TIC tienen para el aprendizaje y la docencia (Valerio y Valenzuela, 2011). De esta manera, los avances experimentados en las TIC permiten formas innovadoras para afianzar aspectos relacionados con el conocimiento, y es en este contexto que una de estas herramientas empieza a tener en la educación un campo de aplicación fértil: la realidad aumentada (RA). Los requerimientos básicos que debe satisfacer una aplicación para que sea considerada de RA es que: (i) combine objetos reales y virtuales, (ii) provea interacción en tiempo real y, (iii) alinee correctamente los objetos virtuales sobre el ambiente real.

La RA forma parte de las tecnologías con mayor potencial en la enseñanza y de los procesos de aprendizaje. La RA mezcla lo que se puede apreciar en la realidad combinándolo con un entorno virtual (existente sólo de forma aparente), interactuando en tiempo real a través de un dispositivo tecnológico para visualizar de manera directa o indirecta un entorno con una realidad mixta. Consta de cuatro elementos básicos: un dispositivo que capture la realidad física, un dispositivo donde proyectar la combinación de

imágenes reales y digitales, un elemento de procesamiento y un activador formado por el conjunto de datos que alimenta el *software* (Blázquez, 2017). En educación, se define como aquella información adicional que se obtiene de la observación de un entorno con el objetivo de innovar el proceso de enseñanza brindando una herramienta que presente al usuario interacción, entretenimiento y que, además, motive su aprendizaje. Esta RA puede ser una imagen, un archivo de audio, un video o un enlace. El uso de la tecnología en el ámbito educativo es una estrategia que puede apuntalar la actividad docente ya que, si de manera cotidiana los profesores usan tecnología que les permite en el proceso de enseñanza, que los integrantes compartan información, inquietudes, conocimientos e intercambios de ideas, la aplicación de estas tecnologías motivaría a los estudiantes a una mejor adquisición y comprensión de los contenidos de algún tema en particular (Montecé-Mosquera et al., 2017).

Así, un elemento central que promueve el desarrollo y utilización de herramientas educativas apoyadas por tecnología como la RA (y en algunos casos la reconstrucción 3D), es generar una alta motivación en los estudiantes. Existen diversidad de estudios que muestran las aplicaciones prácticas de la RA (Prendes, 2015). Prueba de ello es el trabajo realizado por Gazcón et al. (2016), quienes trabajaron con estudiantes de primaria y secundaria elaborando recursos de RA para que los participantes aprendieran temas de paleontología, encontrando una buena respuesta y resultados alentadores tanto de los profesores como de los estudiantes. Los autores manifestaron que los estudiantes se encontraban muy motivados para realizar las actividades señaladas en su programa, lo

mismo que los profesores. En este sentido, el uso de las TIC, específicamente la RA, es particularmente útil en la enseñanza de las ciencias y en aquellas actividades que requieren del uso de conceptos complejos; sin embargo, es de gran importancia escoger bien los objetivos a conseguir con la utilización de estos sistemas y tener en cuenta a qué audiencia nos dirigimos pero sobre todo considerar que ningún recurso tecnológico es la solución a los problemas con los que nos enfrentamos en el aula pero tales recursos pueden ser opciones que tengan resultados positivos en educación (Prendes, 2015).

Por otro lado, en disciplinas tan complejas, como Medicina, también se han empezado a generar herramientas de este tipo para que los profesionales de la medicina desempeñen sus competencias de una forma más rápida y efectiva. Esta tecnología puede facilitar el trabajo en cirugía ya que, por ejemplo, se puede cargar en el dispositivo información obtenida con una resonancia magnética y superponerla sobre el cuerpo del paciente en tiempo real, de forma que se pueda observar el interior del paciente de una forma no invasiva, por lo que se minimizan los riesgos para su salud, así como también hay experiencias del uso de la RA en programas enfocados para el tratamiento de adicciones y fobias (Vidal-Ledo et al., 2017). En este sentido, la aplicabilidad de la RA en el aprendizaje de conceptos anatómicos y fisiológicos podría facilitar la adquisición de conceptos que son complejos y que a los alumnos les genera temor por la naturaleza de los mismos.

La realidad aumentada está referida a la utilización de las tecnologías en tiempo real para incrementar la visibilidad de la información. De esta forma es posible integrar a tiempo real una imagen en

movimiento similar a la realidad que facilitaría la comprensión de un texto. Pero ¿por qué esto beneficia el aprendizaje? En primer lugar, habría que tener en cuenta que en la realidad natural del ser humano todo o casi todo está en constante movimiento, de forma que nuestro cerebro sintetiza los aspectos holísticos y secuenciales del entorno. Además, para la percepción de las imágenes en movimiento intervienen los dos hemisferios cerebrales, de forma que cada plano se procesa holísticamente por el hemisferio derecho y la sucesión secuencial de los planos por el hemisferio izquierdo (García-Jiménez, 1995). El hemisferio derecho se ha relacionado en mayor grado con la emoción, explicando así la mayor capacidad de las imágenes para movilizar las emociones (Moreno-Sánchez y Jiménez, 2016), teniendo un impacto importante sobre la motivación de los alumnos. En el ámbito educativo esto podría tener gran relevancia, en tanto la realidad aumentada incrementaría la motivación de los alumnos, como así se ha comprobado en recientes investigaciones analizando el rendimiento de los alumnos en diferentes etapas educativas (Gómez et al., 2020).

Por otro lado, la codificación multisensorial de la información tiene un efecto positivo sobre el aprendizaje. En principio la modalidad visual es la prioritaria en el ser humano, aunque el funcionamiento de nuestro cerebro se basa en la integración sensorial de la información proveniente de distintas modalidades sensoriales. De esta forma, los estímulos que combinan modalidades sensoriales diferentes atraer mejor la atención que aquellos que se presentan en modalidades sensoriales aisladas, generando una mejora en el recuerdo posterior (Botta et al., 2011). En entornos naturales los objetos se procesan a

nivel multisensorial, por lo que cabe pensar que nuestro cerebro esté preparado para procesar los estímulos en estas condiciones. Tanto es así, que una sola exposición multisensorial puede mejorar la memoria, respecto a estímulos presentados en una sola modalidad sensorial, mejorando la discriminación de objetos en los primeros 100 ms (Matusz et al., 2017). El efecto positivo de la información presentada de manera multisensorial en la memoria se ha mostrado robusto utilizando diferentes estímulos y paradigmas de investigación (Heikkilä y Tiippana, 2016; Ueno et al., 2015). Estos datos apuntan a los beneficios que, sobre el aprendizaje, pueden tener la presentación de la información en diferentes modalidades sensoriales, aspectos que se promueven en la realidad aumentada y que explicarían en parte las mejoras en el rendimiento de los alumnos en las fases de codificación, consolidación y recuperación de la información. La integración de todos estos aspectos en el ámbito educativo facilitarían el proceso de aprendizaje.

Conclusiones

La relación entre aprendizaje, neurociencias y neuropsicología plantea algunas dificultades. A nivel práctico se reflejan mejor las capacidades cognitivas de los niños con medidas conductuales que cerebrales. Además, la cuestión más importante es si el niño aprende, cómo puede reflejarse en su comportamiento, y no tanto, la evidencia de que el cerebro cambia en respuesta a una instrucción (Bowers, 2016). Esta crítica es cierta, pero también lo es que la Neurociencia Educativa trata de encontrar la simbiosis adecuada entre cerebro, cognición y aprendizaje, y que el conocimiento de esta relación permitiría optimizar las estrategias de aprendizaje de las que hemos hablado en

este artículo, y que han demostrado, en algunos casos, claramente su efectividad en el rendimiento académico. Lo que trata de saber la Neurociencia Cognitiva es el porqué de esta efectividad y que no se quede simplemente en un efectivo ejercicio de ensayo y error basado en la acertada intuición de los investigadores y profesores.

En este sentido podemos concluir con los siguientes puntos: 1) la simulación del funcionamiento del cerebro parece ser una estrategia adecuada para incrementar el rendimiento de los alumnos; 2) métodos de aprendizaje que incrementen la atención y la motivación serán efectivos en el aprendizaje por su efecto sobre los niveles de diferentes neurotransmisores como la dopamina y la acetilcolina, que facilitan la formación y mantenimiento de conexiones sinápticas; 3) ambientes educativos donde se promuevan niveles de activación fisiológica, cognitiva y conductual óptimos favorecerá que los alumnos lleguen a su punto óptimo de rendimiento.

Referencias

- Aguirre-Pérez, D. M., Otero-Ojeda, G. A., Pliego-Rivero, F. B., y Ferreira-Martínez, A. A. (2007). Relationship of working memory and EEG to academic performance: A study among high school students. *The International Journal of Neuroscience*, 117(6), 869-882. <https://doi.org/10.1080/00207450600910077>
- Anderson, O. R. (1992). Some interrelationships between constructivist models of learning and current neurobiological theory, with implications for science education. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(10),

- 1037-1058.
<https://doi.org/10.1002/tea.3660291004>
- Ausubel, D. P. (1968). *Educational psychology: A cognitive viewpoint*. Rinehart and Winston.
- Ausubel, D. P. (2000) *The acquisition and retention of knowledge: A cognitive view*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working Memory*. Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (1990). *Human Memory: Theory and Practice*. Allyn and Bacon.
- Bara, G., y Xhomara, N. (2020). The effect of student-centered teaching and problem-based learning on academic achievement in science. *Journal of Turkish Science Education*, 17(2), 180-199.
<https://doi.org/10.36681/tused.2020.20>
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge University Press.
- Bartsch, L. M., Singmann, H., y Oberauer, K. (2018). The effects of refreshing and elaboration on working memory performance, and their contributions to long-term memory formation. *Memory & Cognition*, 46(5), 796-808.
<https://doi.org/10.3758/s13421-018-0805-9>
- Blázquez, A. (2017). *Realidad aumentada en educación*. Monográfico (Manual). UPM.
- Botta, F., Santangelo, V., Raffone, A., Sanabria, D., Lupiáñez, J., y Olivetti Belardinelli, M. (2011). Multisensory integration affects visuo-spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37(4), 1099-1109.
<https://doi.org/10.1037/a0023513>
- Bowers, J. S. (2016). The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychological Review*, 123(5), 600-612.
<https://doi.org/10.1037/rev0000025>
- Bramão, I., Karlsson, A., y Johansson, M. (2017). Mental reinstatement of encoding context improves episodic remembering. *Cortex*, 94, 15-26.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.06.007>
- Campeanu, S., Craik, F.I., y Alain, C. (2015). Speaker's voice as a memory cue. *International Journal of Psychophysiology*, 95(2), 167-174.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.08.988>
- Cañas, A. J., Reiska, P., y Möllits, A. (2017). Developing Higher-Order thinking skills with concept mapping: A case of pedagogic frailty. *Knowledge Management & E-Learning*, 9, 348-365.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87-114.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Dando, C.J., Wilcock, R., y Milne, R. (2009). The cognitive interview: The efficacy of a modified mental reinstatement of context procedure for frontline police investigators. *Applied Cognitive Psychology*, 23(1), 138-147.
<https://doi.org/10.1002/acp.1451>
- Davies, G., y Milne, A. (1985). Eyewitness composite construction. A function of mental or physical reinstatement of context. *Criminal Justice and Behaviour*, 12(2), 209-220.
<https://doi.org/10.1177/0093854885012002004>
- Davies, M. (2012). Concept mapping, mind mapping and argument mapping: What are the differences and do they matter? *Higher Education*, 62(3), 279-301.

- <https://doi.org/10.1007/s10734-010-9387-6>
- Davis, H. P., y Squire, L. R. (1984). Protein synthesis and memory: A review. *Psychological Bulletin*, 96(3), 518–559.
- de Kloet, E. R., Oitzl, M. S., y Joels, M. (1999). Stress and cognition: Are corticosteroids good or bad guys? *Trends Neurosciences*, 22(10), 422-426. [https://doi.org/10.1016/s0166-2236\(99\)01438-1](https://doi.org/10.1016/s0166-2236(99)01438-1)
- Deslauriers, L., Schelew E., y Wieman C. (2011): Improved learning in a large-enrollment physics class. *Science*, 332(6031), 862-864. <https://doi.org/10.1126/science.1201783>
- Dubuc, M. M., Aubertin-Leheudre, M., y Karelis, A. D. (2020). Relationship between interference control and working memory with academic performance in high school students: The Adolescent Student Academic Performance longitudinal study (ASAP). *Journal of Adolescence*, 80, 204-2013. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2020.03.001>
- Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., y Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1), 4-58. <https://doi.org/10.1177/1529100612453266>
- Ebbinghaus, H. (1913). *Memory* (H. A. Ruger y C. E. Bussenius, Trans.). Teachers College, Columbia University. (Original work published 1885).
- Fisher, R. P., y Craik, F. I.M. (1980). The effects of elaboration on recognition memory. *Memory & Cognition*, 8, 400-404. <https://doi.org/10.3758/BF03211136>
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., y Wenderoth, M. P. (2014): Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- Froemke, R. C., Carcea, I., Barker, A. J., Yuan, K., Seybold, B. A., Martins, A. R. O., Zaika, N., Bernstein, H., Wachs, M., Levis, P. A., Polley, D. B., Merzenich, M. M., y Schreiner, C. E. (2013). Long-term modification of cortical synapses improves sensory perception. *Nature Neuroscience*, 16, 79-88. <https://doi.org/10.1038/nn.3274>
- García-Jiménez, J. (1995). *La imagen narrativa*. Thomson Paraninfo.
- Gazcón, N., Larregui, J., y Castro, S. (2016). La Realidad Aumentada como complemento motivacional. Libros Aumentados y Reconstrucción 3D. *Revista Iberoamericana de Educación en Tecnología y Tecnología en Educación*, 17, 7-15.
- Goldberg, E. (2001). *The executive brain: Frontal lobes and the civilized mind*. Oxford University Press.
- Gómez, G., Rodríguez, C., y Marín, J. A. (2020). The transcendence of Augmented Reality in student motivation. A systematic review and meta-analysis. *Alteridad Revista de Educación*, 15(1), 36-46. <https://doi.org/10.17163/alt.v15n1.2020.03>
- Hammond, L., Wagstaff, G.F., y Cole, J. (2006). Facilitating eyewitness memory in adults and children with context reinstatement and focused meditation. *Journal of Investigative Psychology and Offender Profiling*, 3(2), 117-130. <https://doi.org/10.1002/jip.47>

- Heckers, S., Weiss, A. P., Alpert, N. M., y Schacter, D. L. (2002). Hippocampal and brain stem activation during word retrieval after repeated and semantic encoding. *Cerebral Cortex*, 12(9), 900–907. <https://doi.org/10.1093/cercor/12.9.900>
- Heikkilä, J., y Tiippana, K. (2016). School-aged children can benefit from audiovisual semantic congruency during memory encoding. *Experimental Brain Research*, 234(5), 1199-1207. <https://doi.org/10.1007/s00221-015-4341-6>
- Hockley, W. E. (2008). The effects of environmental context on recognition memory and claims of remembering. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(6), 1412-1429. <https://doi.org/10.1037/a0013016>
- Hockley, W.E., Bancroft, T.D., y Bryant, E. (2012). Associative and familiarity-based effects of environmental context on memory. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 66(2), 81-89. <https://doi.org/10.1037/a0027136>
- Hübener, M., y Bohoeffer, T. (2014). Neuronal plasticity: Beyond the critical period. *Cell*, 159(4), 727-737. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.035>
- Kalyuga, S. (2013). Effects of learner prior knowledge and working memory limitations on multimedia learning. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 83, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.06.005>
- Kang, S. H. K. (2016). Spaced repetition promotes efficient and effective learning: Policy implications for instruction. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(1), 12-19. <https://doi.org/10.1177/2372732215624708>
- Karakuyu, Y. (2010). The effect of concept mapping on attitude and achievement in a physics course. *International Journal of Physical Sciences*, 5, 724-737.
- Karpicke, J. D. (2017). *Retrieval-based learning: A decade of progress*. En J. H. Byrne (Series Eds.), *Learning and memory: A comprehensive reference* (2a. ed., pp. 487-514). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809324-5.21055-9>
- Karpicke, J. D., y Blunt, J. R. (2011). Retrieval practice produces more learning than elaborative studying with concept mapping. *Science*, 331(6018), 772-775. <https://doi.org/10.1126/science.1199327>
- Kim, E. J., Pellman, B., & Kim, J. J. (2015). Stress effects on the hippocampus: A critical review. *Learning & Memory*, 22(9), 411-416. <https://doi.org/10.1101/lm.037291.114>
- Kinchin, I. M. (2011). Visualising knowledge structures in biology: Discipline, curriculum and student understanding. *Journal of Biological Education*, 45(4), 183-189. <https://doi.org/10.1080/00219266.2011.598178>
- Kompus, K., Olsson, C.-J., Larsson, A., y Nyberg, L. (2009). Dynamic switching between semantic and episodic memory systems. *Neuropsychologia*, 47(11), 2252–2260. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.031>
- Lupien, S. J., & McEwen, B. S. (1997). The acute effects of corticosteroids on cognition: Integration of animal and human model studies. *Brain Research Reviews* 24(1), 1-27. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(97\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(97)00004-0)

- Maguire, E. A. (2001). Neuroimaging studies of autobiographical event memory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 356(1413), 1441–1451. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0944>
- Markant, D. B., Ruggeri, A., Gureckis, T. M., y Xu, F. (2016). Enhanced memory as a common effect of active learning. *Mind, Brain and Education*, 10(3), 142-152. <https://doi.org/10.1111/mbe.12117>
- Matusz, P. J., Wallace, M. T., y Murray, M. M. (2017). A multisensory perspective on object memory. *Neuropsychologia*, 105, 243-252. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.04.008>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/h0043158>
- Montecé-Mosquera, F., Verdesoto-Arguello, A., Montecé-Mosquera, C., y Caicedo-Camposano, C. (2017). Impacto de la realidad aumentada en la educación del siglo XXI. *European Scientific Journal*, 13(25), 129-137. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n25.p129>
- Moreno-Sánchez, I., y Jiménez, J. (2016). Una perspectiva neurobiológica y comunicacional de la imagen y de la realidad aumentada. *ICONO*, 16(1), 1. <https://doi.org/10.7195/ri14.v16i1.1102>
- Nesbit, J. C., y Adesope, O. O. (2006). Learning with concept and knowledge maps: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 76(3), 413-448. <https://doi.org/10.3102/00346543076003413>
- Novak, J. D., y Cañas, A. J. (2006). *The theory underlying concept maps and how to construct them*. Technical report IHMC CmapTools
- Novak, J. D., y Gowin, D. B. (1984) *Learning how to learn*. Cambridge University Press.
- Ortega-Tudela, J. M., Lechuga, M. T., y Gómez-Ariza, C. J. (2019). A specific benefit of retrieval-based concept mapping to enhance learning from texts. *Instructional Science*, 47, 239-255.
- Owens, M. T., y Tanner, K. D. (2017). Teaching as brain changing: Exploring connections between neuroscience and innovative teaching. *CBE Life Sciences Education*, 16(2), fe2. <https://doi.org/10.1187/cbe.17-01-0005>
- Prendes, C. (2015). Realidad aumentada y educación: análisis de experiencias prácticas Pixel-Bit. *Revista de Medios y Educación*, 46, 187-203. <https://doi.org/10.12795/pixelbit.2015.i46.12>
- Reagh, Z. M., Murray, E. A., y Yassa, M. A. (2017). Repetition reveals ups and downs of hippocampal, thalamic and neocortical engagement during mnemonic decisions. *Hippocampus* 27(2), 169-183. <https://doi.org/10.1002/hipo.22681>
- Reed, A., Riley, J., Carraway, R., Carrasco, A., Perez, C., Jakkamsetti, V., y Kilgard, M. P. (2011). Cortical map plasticity improves learning but is not necessary for improved performance. *Neuron*, 70, 121-31. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.02.038>
- Reh, R. K., Dias, B. G., Nelson III, C. A., Kaufer, D., Werker, J. F., Kolb, B., Levine, J. D., & Hensch, T. K. (2020). Critical period regulation across multiple timescales. *PANAS*, 117(38), 23242-23251.

- <https://doi.org/10.1073/pnas.1820836117>
Salmerón, L. (2011). ¿Por qué realizar un examen mejora nuestro aprendizaje? Lecciones científicas y educativas del efecto del test. *Ciencia Cognitiva*, 5(1), 19-21.
- Schaal, S. (2010). Cognitive and motivational effects of digital concept maps in pre-service science teacher training. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2(2), 640-647.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.03.077>
- Schultz, W., y Dickinson, A. (2000). Neuronal coding of prediction errors. *Annual Review of Neuroscience*, 23(1), 473-500.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.473>
- Solaz-Portolés, J. J., y Sanjosé-López, V. (2009). Working memory in science problema solving: A review of research. *Revista Mexicana de Psicología*, 26(1), 79-90.
- Stern, S. A., y Alberini, C. M. (2013). Mechanisms of memory enhancement. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Systems Biology and Medicine*, 5(1), 37-53.
<https://doi.org/10.1002/wsbm.1196>
- Takeuchi, T., Duzskiewicz, A. J., y Morris, R. G. M. (2014). The synaptic plasticity and memory hypothesis: Encoding, storage and persistence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369, 1-14.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0288>
- Tulving, E., y Thomson, D.M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 359-380.
<https://doi.org/10.1037/h0020071>
- Ueno, D., Masumoto, K., Sutani, K., y Iwaki, S. (2015). Latency of modality-specific reactivation of auditory and visual information during episodic memory retrieval. *Neuroreport*, 26(6), 303-308.
<https://doi.org/10.1097/WNR.0000000000000325>
- Valerio, G., y Valenzuela, J. R. (2011). Redes sociales y estudiantes universitarios: Del nativo digital al informívoro saludable. *El Profesional de la Información*, 20(6), 667-670.
<https://doi.org/10.3145/epi.2011.nov.10>
- Vidal-Ledo, M., Lío Alonso, B., Santiago Garrido, A., Muñoz Hernández, A., Morales Suárez, I., y Toledo Fernández, A. (2017). Realidad aumentada. *Educación Médica Superior*, 31(2). Recuperado de <http://ems.sld.cu/index.php/ems/article/view/1161/515>
- Wong, C.K., y Read, J.D. (2011). Positive and negative effects of physical context reinstatement on eyewitness recall and identification. *Applied Cognitive Psychology*, 25(1), 2-11.
<https://doi.org/10.1002/acp.1605>
- Wong, R. O., & Lichtman, J. W. (2003). Synapse elimination. En L. R. Squire, Fe. E. Bloom, S. K. McConnell, J. L. Roberts, N. C. Spitzer y M. J. Zigmond (Eds.), *Fundamental neuroscience* (pp. 533-554). Academic Press.
- Yang, J. J., Zhan, L. X., Wang, Y. Y., Du, X. Y., Zhou, W. X., Ning, X. L., Sun, Q., y Moscovitch, M. (2016). Effects of learning experience on forgetting rates of item and associative memories. *Learning & Memory*, 23(7), 365-378.
<https://doi.org/10.1101/lm.041210.115>
- Yerkes, R. M., y Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of Comparative Neurological Psychology*, 18(5), 458-482.
<https://doi.org/10.1002/cne.920180503>
- Zadina, J. N. (2015). The emerging role of educational neuroscience in education

reform. *Psicología Educativa*, 21(2), 71-77.

<https://doi.org/10.1016/j.pse.2015.08.005>

Zhan, L., Guo, D., Chen, G., Y Yang, J. (2018). Effects of repetition learning on associative recognition over time: Role of the hippocampus and prefrontal cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, 277.

<https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00277>

[7](#)

Zhang, Y., Han, K., Worth, R., y Liu, Z. (2020). Connecting concepts in the brain by mapping cortical representations of semantic relations. *Nature Communications*, 11, 1877.

<https://doi.org/10.1038/s41467-020-15804-w>