

**Publicaciones Electrónicas
Instituto Mexicano de
Ciencias y Humanidades**

**Cómo aprende el cerebro humano
matemática y otras disciplinas.**

Emilio Lluis-Puebla

www.imch.org.mx

Academia de Ciencias. Vol. 8 (2026)



Cómo aprende el cerebro humano Matemática y otras disciplinas. Bases neurocientíficas del aprendizaje.*

Emilio Lluis-Puebla

La Matemática es una de las Bellas Artes,
la más pura de ellas,
que tiene el don de ser
la más precisa
y la precisión de las Ciencias.
E. Lluis-Puebla.

Resumen

En este artículo se expone la experiencia personal del autor, así como las justificaciones de la neurociencia sobre el aprendizaje de la Matemática y la Música. No se pretende originalidad alguna salvo la propia experiencia del autor como estudiante y profesional.

Comenzaré diciéndoles lo que por años le comunico de manera informal a mis alumnos al iniciar el curso, acerca de cómo funciona nuestro cerebro para aprender, en particular la Matemática y la Música.

Esto es fundamental. El no saberlo es como si un humano del siglo V tratara de usar un celular actual, sin instrucciones. Es causa de enorme frustración en los estudiantes que durante sus estudios preuniversitarios les bastaba con leer rápidamente la noche anterior al examen, el material del cual se le va a evaluar.

Al ingresar a una carrera como la de matemática o música se dan cuenta demasiado tarde o ni siquiera se dan cuenta porque nadie se los dijo, cómo funciona su cerebro. Esta podría ser una de las razones, entre muchas otras, de que reprueben las materias a pesar de haber sacado 10 en sus estudios preuniversitarios.

Primero les comentaré de manera muy sencilla e informal, para que sea muy fácil de entender, el cómo funciona nuestro cerebro para aprender. En seguida lo haré mediante una explicación menos informal con base en la neurociencia.

¿Cómo aprende nuestro cerebro algo de matemática o de música? ¿Bastaría conectarse una memoria USB en alguna parte de nuestro cuerpo y listo, ya sabemos Álgebra Moderna o podemos dar un concierto? Pues todavía no. Así no funciona nuestro cerebro.

*Texto correspondiente a la conferencia con el mismo título. (06/01/2026).

De manera muy informal les digo que nuestro cerebro funciona mediante conexiones neuronales, las cuales son reacciones químicas y eléctricas que tienen lugar en el tiempo.

El tiempo incluye el descanso y el sueño. Un esquema de lo que sucede en una clase de matemática es el siguiente. Hay varios estilos de enseñanza, pero el más usual es el que describo a continuación. Ustedes escuchan (y ven) al profesor exponer cierto concepto matemático de forma hablada y escrita en el pizarrón. No lo entienden bien a la primera. Se les cae el mundo encima y quizá digan ¡qué es esto! Después se van a su casa y leen sus notas que tomaron y el libro de texto. Lo ideal es que ustedes lo escriban en papel. No lo comprenden del todo, pero parece un poco más claro. Ya no se les cae el mundo encima. Se duermen bien y por la mañana puede ser que digan, ¡Ajá! Ya lo entendí. Era trivial. Cuando decimos que algo es muy difícil, estamos diciendo que el cerebro requiere de más conexiones neuronales y más tiempo para realizarlas. Muchas veces se requiere de días, o semanas, o meses o años para comprender lo tratado de meter o metido al cerebro. Así es.

Esto que les describo de manera muy sencilla para que se comprenda es un proceso muy complejo que a continuación les escribiré de manera un poco menos informal. El no realizar este proceso implica no aprender. Hay que realizarlo todos los días un poquito y no dejarlo para la noche anterior al examen porque no va a funcionar. Es como querer comer la comida de todo un mes en una sola cena. Se van a indigestar. Así no funciona nuestro cerebro y no hay que pedirle lo imposible. Hay que estudiar, lo cual significa, hacer las conexiones neuronales. Si no se estudia, no se puede asimilar el curso. Hay que estudiar todos los días, como comer.

El gran matemático Henri Poincaré, en 1908, ofreció una conferencia para la Sociedad de Psicología en París donde trató de explicar lo que sucede en el cerebro de un matemático. Este proceso describe la creación en la matemática una vez que se tienen asimilados algunos conceptos y se pregunta el qué sucedería si se asume tal o cual cosa. Este proceso también describe la importancia del tiempo el cual es requerido para comprender. Volveré a esto más adelante.

Y qué hay acerca de cómo aprender a tocar un instrumento, digamos, el piano. Pues es más complejo. Además de lo que les (platicué anteriormente) escribí arriba, interviene la vista para leer una partitura, coordinar con los dedos apropiados y el cuerpo para tocar un pasaje musical, junto con el oído para corroborar lo que se está haciendo y juntamente con los pies que se encargan de los pedales. Pero sobre todo esto, la forma de comunicar las notas y la expresividad.

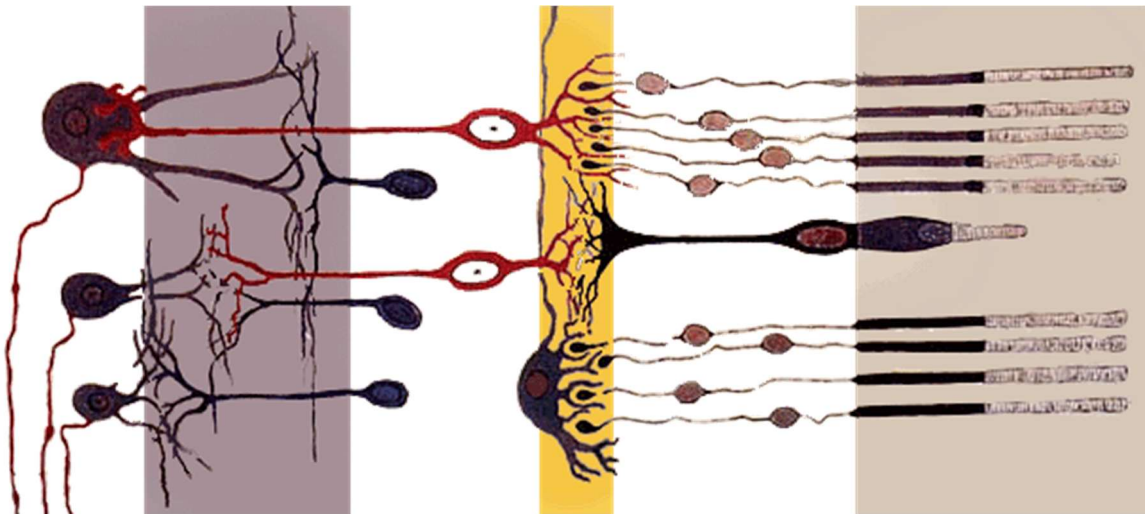
Alguien que juega un deporte, por ejemplo, el tenis de mesa o el tenis de cancha practica todos los días los movimientos para pegarle a la pelotita de tal manera que el contrincante no le pegue a la misma pelotita. Hay toda una técnica para hacerlo lo cual es una manera

de realizar conexiones neuronales especiales para ese juego. Pueden imaginarse lo propio para otros deportes o instrumentos musicales.

Es inaudito cómo cambió nuestra visión del cerebro en apenas unas décadas. Aunque hoy nos parece obvio (para quienes estudiaron esto en la educación preuniversitaria) que el cerebro es una red de células conectadas, a finales del siglo XIX, la comunidad científica estaba dividida en una de las mayores polémicas de la Historia de la Medicina.

Aunque en la década de 1830 ya se habían observado "células" en el tejido nervioso (por Jan Purkinje), no se sabía si eran independientes. La mayoría de los científicos creía en la "Teoría Reticular", que decía que el cerebro era una malla continua de fibras pegadas, como en una red de pescar, sin interrupciones.

En 1888, el científico español Santiago Ramón y Cajal, utilizando una técnica de tinción inventada por el italiano Camillo Golgi, demostró que el sistema nervioso está compuesto por células individuales. Cajal probó que las neuronas son entidades genéticas y metabólicamente distintas que no se tocan físicamente, sino que se comunican a través de pequeños espacios. Por esto, Cajal es considerado el "padre de la neurociencia moderna". Ambos, Cajal y Golgi ganaron el Premio Nobel por esto en 1906, pero fue Cajal quien tuvo la razón de que las neuronas están aisladas una de la otra y no pegadas como en una red creía Golgi.



Dibujo del corte axial de la retina, por Ramón y Cajal, publicado en su manual *Histologie du Système Nerveux de l'Homme et des Vertébrés*, en la edición francesa de 1911.

Veamos una anécdota acerca de Cajal y Golgi. La rivalidad entre Santiago Ramón y Cajal y el italiano Camillo Golgi es una de las más tensas y extrañas de la historia de la ciencia. El Comité Nobel decide darles el premio a ambos en 1906, pero Cajal sostenía que la teoría de Golgi era totalmente errónea.

Cuando llegó el momento de los discursos del Nobel, la tensión era muy grande. Golgi fue el primero en hablar. En lugar de agradecer el premio, usó su discurso para atacar la teoría de la neurona de Cajal. Insistió en que el cerebro era una red continua y llamó "equivocados" a quienes pensaban diferente. Fue un gesto considerado de muy mala educación por la comunidad científica. Don Santiago, que era un hombre de gran carácter, pero muy caballeroso, decidió no rebajarse. En su discurso del día siguiente, ignoró los ataques personales y se limitó a presentar sus pruebas visuales y científicas con una elegancia aplastante. Citó a todos los que le ayudaron, incluso mencionando que usaba el método de Golgi, lo que le hizo quedar mucho mejor ante el público.

Al final, la historia le dio la razón absoluta a Cajal. Golgi murió años después sin aceptar nunca la existencia de las neuronas individuales, a pesar de que toda la ciencia ya las aceptaba como un hecho.

Una vez que Cajal demostró que las neuronas estaban separadas, surgió la pregunta: ¿cómo pasa la información de una a otra si no se tocan? El término "Sinapsis" fue acuñado en 1897 por el fisiólogo británico Charles Sherrington, Premio Nobel en Medicina 1932. Él propuso que debía existir una zona de contacto funcional para que la señal saltara de una neurona a la siguiente. Las conexiones neuronales comenzaron a trabajarse de forma científica, dejando de ser una simple idea de "cables unidos" para entenderse como un proceso de transmisión activa de señales.

Aunque Cajal tenía razón, no fue hasta la década de 1950 cuando, gracias a la invención del microscopio electrónico por Ernst Ruska, Premio Nobel de Física 1986, se pudo ver por primera vez el espacio físico o hendidura sináptica que separa a dos neuronas, confirmando definitivamente que se conectan, pero no se fusionan.

Como les dije anteriormente, Las conexiones neuronales, conocidas como sinapsis, son de hecho una combinación de procesos químicos y eléctricos.

Dentro de una misma neurona, el mensaje viaja como un impulso eléctrico llamado "potencial de acción". Este se genera por el movimiento de partículas cargadas (iones, como el sodio y el potasio) a través de la membrana celular.

Algunas sinapsis eléctricas permiten que estos iones fluyan directamente de una neurona a otra, logrando una transmisión casi instantánea.

La mayoría de las sinapsis son químicas. Cuando el impulso eléctrico llega al final de la neurona, provoca la liberación de neurotransmisores (mensajeros químicos) en el espacio sináptico. Estos neurotransmisores cruzan el espacio y se unen a receptores en la neurona siguiente, lo que provoca que se inicie un nuevo impulso eléctrico o se inhiba la transmisión de la señal.

De manera sencilla, las conexiones neuronales (sinapsis) podemos verlas como los puntos de encuentro donde las neuronas se pasan mensajes. Son como interruptores biológicos que deciden si un mensaje sigue o se detiene. O bien son uniones donde una señal eléctrica se convierte en un mensaje químico para saltar a la siguiente célula, y a veces, donde la señal eléctrica pasa directamente.

Estas conexiones son fundamentales, ya que son la base de la comunicación en todo nuestro sistema nervioso, permitiéndonos pensar, sentir, movernos y aprender.

Como les comenté antes, escribí arriba, Poincaré ofreció una ponencia en 1908 la cual es uno de los textos más famosos de la Historia de la Ciencia sobre la Psicología de la Creación. Henri Poincaré la ofreció originalmente bajo el título "L'Invention mathématique" (La invención matemática). Fue ofrecida en la Sociedad de Psicología de París en 1908. Las Ideas principales de la ponencia establecen las etapas de la creación:

- a) Preparación: Trabajo consciente intenso.
- b) Incubación: El problema se deja en el inconsciente.
- c) Iluminación: La respuesta aparece de forma súbita.
- d) Verificación: Se comprueba el resultado mediante la lógica.

La estética como guía: El matemático no elige cualquier combinación de ideas, sino aquellas que son bellas y armoniosas, pues suelen ser las más útiles.

Hay varias características estéticas de la Matemática. La universalidad, en el sentido de que casi cualquier rama del conocimiento posee aspectos que se pueden analizar matemáticamente. El desarrollo de argumentos simples y concisos son absolutamente indispensables para el progreso de la Matemática. La selección y formulación de problemas son un arte que depende de la intuición del matemático. Los aspectos estéticos juegan un papel muy importante.

Poincaré escribe que una demostración matemática no es una simple yuxtaposición de silogismos, sino silogismos colocados con cierto orden y que el orden en que son colocados es mucho más importante que los silogismos por sí solos. Comenta que no tiene miedo de

que alguno de éstos se le olvide pues cada uno de ellos tomará su lugar en el arreglo sin el menor esfuerzo.



En resumen, Poincaré describe el proceso de creación (figura anterior): primero se realiza un trabajo consciente acerca del problema, después deja madurar esas ideas en el subconsciente, luego aparece la solución, quizás cuando menos se espera, y finalmente ésta se escribe.

Dicha ponencia es célebre porque Poincaré describe cómo llegó a descubrir las funciones fuchsianas (automorfas) no mediante un razonamiento lógico lineal, sino a través de la aparición de repente de la “feliz idea” mientras subía a un tren.

Poincaré revolucionó la forma en que entendemos la relación entre la lógica y la intuición en la ciencia. Es uno de los testimonios más bellos sobre la intuición y el inconsciente.

Poincaré cuenta cómo estuvo trabajando durante dos semanas en un problema matemático extremadamente difícil (las funciones fuchsianas) sin éxito. Veamos el fragmento específico donde Poincaré narra su famosa anécdota del café y el tren.

"Contrariamente a mi costumbre, bebí una taza de café negro y no pude conciliar el sueño. Las ideas surgían a borbotones; sentía como si chocaran unas con otras hasta que dos de ellas se engancharon, por así decirlo, para formar una combinación estable. Por la mañana... había establecido la existencia de una clase de funciones fuchsianas".

Sin embargo, el momento más icónico ocurrió días después, cuando dejó el trabajo de lado para irse de viaje:

"En aquel momento abandoné Caen, donde residía entonces, para participar en una excursión geológica organizada por la Escuela de Minas. Las peripecias del viaje me hicieron olvidar mis trabajos matemáticos. Al llegar a Coutances, subimos a un transporte para no sé qué paseo. En el momento en que ponía el pie en el estribo, se me ocurrió la idea, sin que nada en mis pensamientos anteriores pareciera haberme preparado para ello, de que las transformaciones que yo había utilizado para definir las funciones fuchsianas eran idénticas a las de la geometría no euclidiana. No verifiqué la idea; no habría tenido tiempo, pues al sentarme en el tren reanudé la conversación empezada, pero tuve de inmediato una certidumbre absoluta".

A manera de broma, pareciera que Poincaré creaba Matemática al subirse o bajarse de un tranvía. Hadamard recomendaba tomarse dos baños de agua caliente para estimular la investigación matemática. Muchos matemáticos beben café, transformándolo en teoremas. También he escuchado que la Matemática se hace caminando, es decir cuando se dejan las ideas en el "inconsciente" y de repente ocurre una "feliz idea", la cual es, quizá, una serie de conexiones neuronales que tienen lugar en el tiempo las cuales se logran mejor cuando no interviene un acto consciente demasiado fuerte que las impida. Este proceso creativo es el mismo que sucede en la composición o interpretación de Música de Arte.

Esta narración revolucionó la Psicología de la Creación pues Poincaré demostró que el cerebro sigue trabajando "en segundo plano" mientras nos dedicamos a otras cosas (como picar piedra). También porque "probamos por medio de la lógica, pero descubrimos por medio de la intuición", la lógica sirve para verificar, pero el salto creativo es intuitivo. Y finalmente porque creía que el inconsciente no elige cualquier idea, sino aquellas que son "bellas". Para él, la belleza matemática es un indicador de verdad.

Este texto sigue siendo hoy en día una referencia obligatoria en estudios sobre la creatividad y la neurociencia del pensamiento. Todo esto, aunque se refiere a la creación de la matemática, ilustra que el tiempo en que permanece una idea o ideas en el cerebro es fundamental para aprender. Unimos la base biológica (las conexiones neuronales descubiertas por Cajal) con la función mental superior (la intuición descrita por Poincaré).

Para continuar este hilo entre la estructura del cerebro y la mente, mencionaré a un notable contemporáneo de Cajal y Poincaré que intentó unir ambos mundos de forma audaz: Sigmund Freud y su faceta menos conocida como neurocientífico. Antes de inventar el psicoanálisis, Freud era un neurólogo que deseaba encontrar la base física de la mente.

Mientras Cajal descubría la neurona y Poincaré analizaba la intuición, Freud intentó escribir un libro donde explicaba cómo los estados mentales (como el deseo o la memoria) eran en

realidad flujos de energía entre neuronas. Es de observarse que lo expresado por Freud ocurrió en el mismo año (1895) de la publicación del famoso artículo de Poincaré "Análisis Situs" donde nace la Topología.

Freud propuso que el aprendizaje ocurre porque la resistencia entre ciertas neuronas disminuye tras el uso repetido. Hoy llamamos a esto Plasticidad Sináptica, pero Freud lo intuyó décadas antes de que existiera la tecnología para probarlo.

Sin embargo, Freud abandonó esta línea porque la tecnología de finales del siglo XIX no le permitía "ver" esos procesos. Es decir, abandonó la biología para dedicarse a la psicología pura (el psicoanálisis), diciendo que algún día la biología confirmaría sus teorías.

Si Cajal descubrió las neuronas y Poincaré el poder del inconsciente, Donald Hebb fue quien explicó cómo aprenden las conexiones. Su regla es la base de la neurociencia moderna y de la Inteligencia Artificial (como más adelante veremos): "Las neuronas que se disparan juntas, se conectan entre sí". Esto significa que cuando se piensa en algo repetidamente o se practica una habilidad, las conexiones físicas entre esas neuronas se fortalecen. Es la explicación biológica a por qué Poincaré necesitaba esa fase de "preparación consciente" antes de que su inconsciente hiciera el resto.

Ahora les explicaré cómo es el aprendizaje de la matemática y de una habilidad motora como tocar el piano. Esto involucra una plasticidad y una organización funcional sorprendente en el cerebro humano. En un principio escribí varias versiones que resultaban muy técnicas para el propósito de este escrito. Las fui resumiendo e invitando al lector a consultar la bibliografía para un conocimiento más formal de este apasionante tema.

Bases del Aprendizaje Cerebral

El aprendizaje en general, ya sea conceptual o motor, se basa en la capacidad del cerebro para modificar la fuerza de las conexiones sinápticas entre las neuronas. Como dije, a esto se le llama **plasticidad sináptica**.

Cuando dos neuronas se activan repetidamente de forma simultánea, la conexión entre ellas se fortalece, haciendo que la comunicación futura sea más eficiente. Esto es, esencialmente, cómo se forman y consolidan los recuerdos y las habilidades. A este mecanismo de se llama "Potenciación a Largo Plazo (PLP) en español y (LTP) en inglés".

El aprendizaje matemático depende de la interacción de varias áreas especializadas, principalmente en la corteza parietal y prefrontal. Lo que sigue es un poco técnico pero muy importante.

Existe evidencia de que tenemos un **sentido numérico básico**, llamado el Sistema de Magnitud Aproximada (SMA) (ANS), que se localiza en el surco intraparietal (IPS). Esta área es fundamental para comprender y comparar cantidades, así como manipular números de forma abstracta.

Solamente les diré muy brevemente que el aprendizaje de la matemática abstracta es un ejercicio de la corteza prefrontal para construir una estructura simbólica y lógica, apoyada por la corteza parietal para darle una organización cuasi-espacial, y codificada por las áreas del lenguaje.

La información de un concepto como "anillo" no se "mete" de una sola vez, sino que se construye a través de un proceso de codificación, consolidación y recuperación activa.

Cuando el estudiante lee la definición por primera vez, la información es procesada y retenida en la Memoria de Trabajo (principalmente en la corteza prefrontal). Es una retención frágil, basada en la atención.

El cerebro convierte las palabras y símbolos matemáticos en representaciones fonológicas (el sonido de las palabras) y visuales (los símbolos escritos).

Escribir los axiomas con lápiz y papel obliga a una codificación más profunda. Al escribir, el cerebro no solo lee (entrada visual) sino que también realiza una acción motora y recibe retroalimentación táctil (entrada sensoriomotora). Esto crea múltiples "rutas de acceso" al mismo concepto, fortaleciendo la huella de memoria. Actualmente, muchos estudiantes han perdido esta costumbre.

Aquí es donde entra en juego el tiempo y el descanso. La idea de "dejar madurar" el concepto es fundamental.

El hipocampo actúa como un centro de retransmisión que toma las memorias frágiles de la Memoria de Trabajo y las transfiere a la corteza para su almacenamiento a largo plazo.

La consolidación más efectiva ocurre durante el sueño. Mientras dormimos, el cerebro reproduce y ensaya las conexiones neuronales formadas durante el día. Es en este proceso nocturno donde el concepto de "anillo" se desliga de los ejemplos concretos y se integra en la red de conocimiento abstracto del estudiante (Por ejemplo: conectando "grupo" con "espacio vectorial" o con "anillo"). Este proceso crea el "chunk" (pedazo) cognitivo.

La comprensión real ocurre cuando el estudiante puede recuperar el concepto sin tener la definición enfrente.

El acto de tratar de recordar la definición, los axiomas o un ejemplo clave (sin ver las notas) fortalece las conexiones mucho más que simplemente releerlas. Este "esfuerzo" es la señal más fuerte que el cerebro tiene de que esa información es importante y debe consolidarse.

El entendimiento se verifica cuando el estudiante puede manipular el concepto abstracto (Por ejemplo: probar que un conjunto es un anillo o encontrar un contraejemplo). Esta aplicación práctica refina el esquema mental en la corteza prefrontal.

Ahora, relacionemos lo anterior con aprender a tocar una sonata de Beethoven en el piano. El estudiante, lee la partitura, toca muchas veces un pasaje, lo deja reposar un tiempo y si lo estudió bien, quizá al día siguiente ya lo puede tocar mejor. Con el tiempo quizá podrá tocarlo de memoria. Así sucesivamente podrá tocar la obra completa y quizá un recital de piano con diversas obras. Le llevará mucho tiempo, quizá meses o años tocar un concierto.

Esta es una analogía exacta y totalmente respaldada por la neurociencia del aprendizaje. El proceso de aprender una sonata de Mozart o Beethoven en el piano es una manifestación clara de los mismos principios de codificación, consolidación y automatización que se describieron para los conceptos abstractos.

El tiempo que toma (días, semanas, meses o años) y el método (lectura, repetición, descanso) son el reflejo exacto de cómo el cerebro optimiza y cambia la ubicación de la información.

Reafirmando una vez más, al principio, el estudiante está en la fase cognitiva del aprendizaje motor. El estudiante lee la partitura (código visual) y planifica cada movimiento (dedo, posición) de forma consciente. La memoria de trabajo está sobrecargada al intentar coordinar: qué nota es, qué dedo usar, qué ritmo llevar. Esto es lento, propenso a errores y requiere un alto consumo de energía.

Tocar repetidamente un pasaje fortalece inmediatamente las conexiones sinápticas en la Corteza Motora Primaria y en las áreas premotoras. Los primeros cambios en la ejecución del movimiento son rápidos.

La idea de "dejar reposar" es el punto crucial y la clave del éxito a largo plazo. Como indican las investigaciones, la mejora significativa en una habilidad motora (como tocar el piano) ocurre no durante la práctica, sino entre las sesiones de práctica, especialmente durante el sueño. El sueño REM y el sueño de ondas lentas ayudan al cerebro a reestructurar las secuencias. Es decir, lo que fue una serie de movimientos individuales (ciertas notas) se "aglutina o empaca" en un único programa motor (una escala).

Luego, la información se transfiere de la corteza (control consciente) a los Ganglios Basales y el Cerebelo (control automático e implícito).

Al día siguiente, el estudiante toca mejor porque el cerebro ha reorganizado la información y ha eliminado el "ruido" del día anterior. El circuito motor es más eficiente, lo que se traduce en mayor velocidad y menor esfuerzo.

El objetivo final de tocar de memoria y con fluidez (como en un concierto) es la automatización como si pareciera que se está improvisando.

Tocar de memoria se convierte en una memoria procedimental o "memoria muscular" (un término más bien popular, siendo el cerebro, y no el músculo, el que aprende). Esta memoria está almacenada en los Ganglios Basales y el Cerebelo.

Una vez que la secuencia motora está automatizada, el estudiante ya no necesita el esfuerzo consciente de la corteza prefrontal para cómo mover los dedos. Esto libera los recursos cognitivos para las tareas de nivel superior: interpretación musical, expresión, dinámica, control emocional y la interacción con la sala de conciertos.

Este proceso lleva tiempo (meses o años) porque es la curva de la neuroplasticidad en acción.

En el caso de la Matemática Abstracta, se pasa de entender la definición literal a automatizar la manipulación lógica (corteza prefrontal a esquemas abstractos).

En el caso de la Música, se pasa de descifrar notas a automatizar la secuencia motora (corteza motora a cerebelo/ganglios basales).

Ambos aprendizajes requieren la práctica espaciada con descanso (la maduración) para consolidar las conexiones. La repetición consciente (esfuerzo) es la señal, y el descanso (sueño) es el mecanismo que garantiza el aprendizaje duradero y eficiente. Esto mismo podría decirse del aprendizaje de otras disciplinas o deportes. Para quienes creen que ofrecer una conferencia o un concierto o un juego de tenis bastaría con ponerse ante un pizarrón o sentarse en la banca del piano en la sala de conciertos o tomar la raqueta en una cancha de tenis les podemos decir que no tienen la más mínima idea de cómo funciona el cerebro humano.

De Cajal y Poincaré a la IA

Veamos cómo estas ideas de "conexiones" de 1900 se usan hoy para crear Inteligencia Artificial. Es sorprendente lo mucho que se parecen las redes neuronales artificiales a los dibujos de Cajal.

Es asombroso ver cómo los dibujos de Cajal y las intuiciones de Poincaré sobre el "yo subliminal" son hoy la base de la Inteligencia Artificial.

La Inteligencia Artificial (IA) moderna no se basa en reglas lógicas rígidas, sino en un concepto llamado Redes Neuronales Artificiales, que imita directamente la biología que les platicué anteriormente.

Cajal nos enseñó que la neurona recibe información por las dendritas y la envía por el axón. En la IA, se crean neuronas artificiales (nodos). Al igual que en el cerebro, estas unidades reciben señales numéricas. Si la suma de esas señales es lo suficientemente fuerte, la neurona artificial "se dispara" y envía la información a la siguiente capa.

Recordemos que Hebb decía que "las neuronas que se disparan juntas se conectan". En la IA, esto se llama entrenamiento. Cuando una red neuronal comete un error, el sistema ajusta la "fuerza" (peso) de las conexiones entre los nodos.

Tras millones de repeticiones, la red "aprende" a reconocer un rostro o a traducir un idioma, fortaleciendo los caminos correctos, tal como hace tu cerebro cuando practicas un nuevo idioma.

Poincaré se vuelve relevante. En los modelos de IA actuales (como el que genera imágenes o texto), existe algo llamado espacio latente. Es un lugar matemático abstracto donde la IA organiza conceptos (como "belleza", "matemática" o "azul"). Cuando se solicita algo creativo, la IA navega por ese espacio buscando combinaciones armoniosas, de forma muy similar a como Poincaré describía su "yo subliminal" combinando ideas hasta que "enganchaban" o aparecía la "feliz idea" o el "Ajá, ya lo tengo".

Comparativa entre el Cerebro y la Inteligencia Artificial

Concepto	En el Cerebro (Cajal/Hebb)	En la IA (Deep Learning)
Unidad básica	Neurona biológica	Perceptrón / Nodo
Conexión	Sinapsis química	Peso numérico (Weight)
Aprendizaje	Plasticidad (Hebb)	Retropropagación (Backpropagation)
Creación	Intuición / Inconsciente	Procesamiento en Capas Ocultas

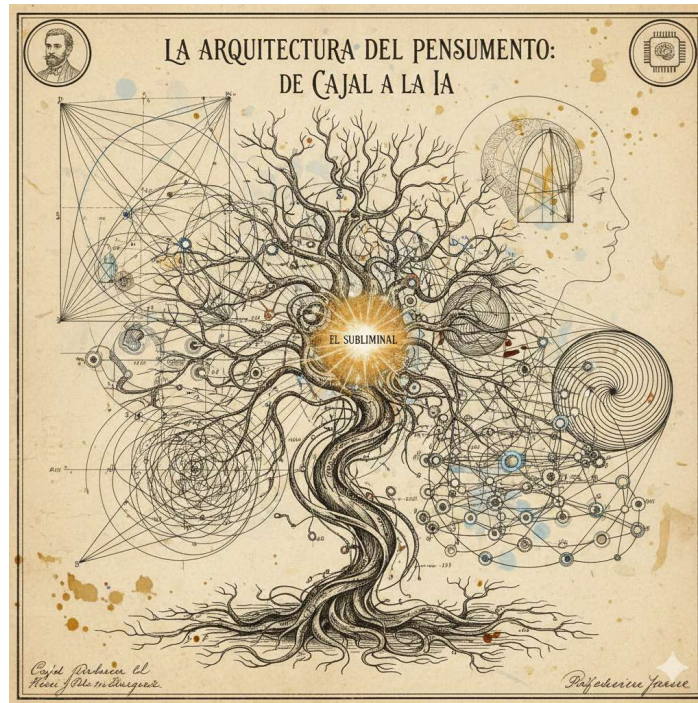


Imagen generada por IA que combina el estilo de dibujo de Cajal, la topología de Poincaré y una red neuronal moderna.

Hemos visto un viaje desde las células de Cajal y la intuición de Poincaré hasta la Inteligencia Artificial. Es maravilloso ver cómo la curiosidad une puntos entre el arte, la matemática, la historia y la tecnología. Al final, lo que Cajal dibujó con tinta y lo que Poincaré sintió en aquel tren es lo mismo que estamos tratando de entender hoy: el misterio de cómo surge una idea.

Actualmente, los neurocientíficos usan modelos de Inteligencia Artificial para tratar de entender cómo funciona el cerebro humano. Es decir, creamos una copia del cerebro para intentar entender por fin el original que Cajal dibujó hace más de 100 años.

También les diré, para que no lo olviden, que lo que vienen ustedes a hacer a la universidad es a hacer conexiones neuronales, las cuales, cuando son muchísimas, constituyen su Capital Humano, en términos de la Economía. Y esto es lo que ustedes intercambiarán (venderán) para que obtengan un medio de intercambio (dinero) para que puedan comprar sus alimentos.

No cabe duda de que nuestro cerebro es fantástico. Como decía mi bisabuelo matemático Sir Michael Atiyah (https://emiliolluis.org/31_archivos/atiyahd.pdf de acuerdo con el

Proyecto o Árbol de Genealogía Matemática), el siglo XXI será el siglo del entendimiento del cerebro humano. Esto lo dijo en 2008, 100 años después de la ponencia de Poincaré de la cual les conté anteriormente.

Recientemente, la Neuromatemática o Neurociencia Cognitiva de la Matemática o Neuroeducación Matemática tiene presencia formal en el ámbito académico y científico. No solamente se enfoca al aprendizaje de la Matemática sino también a la creación de nuevos modelos matemáticos para entender el cerebro.

También, la Neuromusicología o Neurociencia de la Música es un campo científico consolidado que estudia cómo el sistema nervioso procesa, crea y responde a la música. Es un área con muchísima investigación porque, a diferencia del lenguaje o la matemática, la música es una de las pocas actividades humanas que activa casi todas las áreas del cerebro al mismo tiempo.

Existe un vínculo neurológico muy fuerte entre ambas. Muchos estudios sugieren que el entrenamiento musical mejora las capacidades neuromatemáticas. Ambas disciplinas requieren procesamiento secuencial, reconocimiento de patrones y una alta memoria de trabajo. Aprender a tocar un instrumento es quizás el mejor ejemplo de neuroplasticidad. En los músicos, el cuerpo calloso (el "puente" de fibras que conecta los dos hemisferios del cerebro) suele ser más grande y grueso, permitiendo que la información viaje más rápido entre ambos lados del cerebro.

Ambas ciencias nos enseñan que el cerebro humano es un buscador incansable de orden. Ya sea a través de una fórmula elegante o de una música de arte perfecta, nuestra mente está diseñada para encontrar la belleza en la estructura del mundo.

Para finalizar, vuelvo a expresar que la Matemática es una de las Bellas Artes, la más pura de ellas, que tiene el don de ser la más precisa y la precisión de las Ciencias.

Bibliografía

Atiyah, M. Thoughts of a Mathematician. *Brain*. Vol. 131. No. 4, pp. 1156–1160. (2008).

Baddeley, A. D.; Hitch, G. The Psychology of Learning and Motivation. *Working Memory*. 8. (1974).

Citti, G.; Sarti, A. *Neuromathematics of Vision*. Springer. (2014).

Dehaene, Stanislas. *El cerebro matemático*. Siglo XXI. (2016).

Dehaene, S.; Piazza, M.; Pinel, P.; Cohen, L. *Cognitive Neuropsychology*. Three parietal circuits for number processing. 20(3-6). (2003).

Diekelmann, S.; Born, J. *Nature Reviews Neuroscience*. The memory function of sleep. 11(2). (2010).

Ebbinghaus, H. *Über das Gedächtnis (Sobre la memoria)*. (1885).

Google. Gemini (Flash 2.5 y 3.0) [Modelo de lenguaje]. Comunicación personal a través del modelo Gemini. (2025).

Levitin, Daniel J. *Tu cerebro y la música: El estudio científico de una obsesión humana*. Editorial RBA Libros, pp. 200-245. (2008).

Newman, J. *Mathematical Creation. Henri Poincaré. Mathematics in the Modern World*. *Scientific American*. (1948).

Poincaré, H. *Ciencia y Método*. Espasa-Calpe. Madrid. (1963).

Oakley, Barbara. *Aprender a aprender: Cómo tener éxito en matemáticas, ciencia y cualquier otra materia*. Editorial RBA Libros, pp. 25-300. (2015).

Roediger, H. L.; Karpicke, J. D. *Psychological Science*. Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. 17(3). (2006).

santiagoramonycajal.org

Sousa, David A. *How the Brain Learns Mathematics*. Corwin Press, pp. 10-248. (2014).

Walker, M. P.; Stickgold, R. *Nature*. Sleep-dependent learning and memory consolidation. 427(6972). (2004).

Emilio Lluis-Puebla
Departamento de Matemática
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
www.EmilioLluis.org