

# NEUROEDUCACIÓN

## APLICADA AL AULA DE EDUCACIÓN BÁSICA:

ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS FUNDAMENTADAS  
EN EL FUNCIONAMIENTO CEREBRAL  
PARA OPTIMIZAR EL APRENDIZAJE  
EN LA INFANCIA



ATENCIÓN



EMOCIÓN



MOVIMIENTO



MEMORIA



SOCIALIZACIÓN



MOTIVACIÓN



Basado en  
evidencia científica



Estrategias  
prácticas y aplicables



Para docentes  
y educadores



Enfoque integral  
y humanista

Moisés Florentino Michuy Gaíbor  
Amanda Marisol Mazón Gómez  
Andrea Gabriela Barragán García  
Alexandra Piedad Peñaloza Arellano

ISBN: 978-9907-818-64-2



9 789907 818642

ISBN: 978-9907-818-63-5



9 789907 818635

**NEUROEDUCACIÓN APLICADA AL AULA DE EDUCACIÓN BÁSICA:  
ESTRATEGIAS DIDÁCTICAS FUNDAMENTADAS EN EL FUNCIONAMIENTO  
CEREBRAL PARA OPTIMIZAR EL APRENDIZAJE EN LA INFANCIA**



## **Neuroeducación aplicada al aula de educación básica: estrategias didácticas fundamentadas en el funcionamiento cerebral para optimizar el aprendizaje en la infancia**

### **Autores:**

Moisés Florentino, Michuy Gaibor

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-8954-4035>

Correo: [moises.michuy@docentes.gob.ec](mailto:moises.michuy@docentes.gob.ec)

Ministerio de Educación

Amanda Marisol, Mazón Gómez

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5983-4260>

Correo: [amanda.mazon@docentes.edu.ec](mailto:amanda.mazon@docentes.edu.ec)

Ministerio de Educación

Andrea Gabriela, Barragán García

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-8581-3405>

Correo: [andrea.barragan@educacion.gob.ec](mailto:andrea.barragan@educacion.gob.ec)

Ministerio de Educación

Alexandra Piedad Peñaloza Arellano

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-4734-8889>

Correo: [a.penaloza@verbodivino.edu.ec](mailto:a.penaloza@verbodivino.edu.ec)

Ministerio de Educación

## **Editorial “ACACFESA SAS”**

La presente obra fue revisada por 2 pares académicos externos ciegos conforme al proceso editorial de ACACFESA SAS.

Los rigurosos procedimientos editoriales de ACACFESA SAS garantizan la selección de manuscritos por sus aportes significativos al conocimiento y cualidades científicas.

Editorial: ACACFESA SAS.

Sello editorial: (978-9907-818)

Teléfono: (+593) 998955446

Web: <https://acacfesa.com/editorial/index.php/1>

ISBN impreso: 978-9907-818-64-2

ISBN digital: 978-9907-818-63-5

Doi: <https://doi.org/10.70577/xkq3qb94/ACACFESA.EDITORIAL>

Año: Septiembre 2026

### **Aviso Legal**

El contenido de esta obra, que incluye ilustraciones, textos, tablas, gráficos, cuadros y referencias bibliográficas, es responsabilidad única del autor o autores. Lo que se ha dicho, los criterios y los datos no reflejan necesariamente la posición institucional ni el pensamiento de la Editorial ACACFESA SAS.

### **Derechos de Autor ©**

Este documento se publica conforme los términos y condiciones de la EDITORIAL ACACFESA SAS

Esta obra está bajo una licencia internacional



La "Editorial ACACFESA SAS " y todos sus autores tienen la propiedad única de los derechos de autor y de propiedad intelectual e industrial relacionados con el contenido de esta publicación. La reproducción total o parcial de esta obra, su almacenamiento en sistemas informáticos, su tratamiento digital y cualquier tipo de distribución, transmisión o comunicación pública por medios electrónicos, ópticos, mecánicos, químicos, fotográficos o de grabación están prohibidos. Esto se encuentra bajo las sanciones que establece la legislación vigente a menos que se cuente con la autorización previa y por escrito de los titulares del copyright.

Queda excluido únicamente el uso con fines académicos o de investigación científica, siempre que no busque objetivos comerciales y se ejecute sin remuneración, debiendo mencionarse en todo momento a la fuente editorial correspondiente. Los autores son los únicos responsables de las opiniones expresadas en los diferentes capítulos, las cuales no necesariamente representan el punto de vista institucional de la editorial.

### **Constancia de Arbitraje**

La Editorial ACACFESA SAS, certifica que este libro es el resultado de un estudio llevado a cabo por los autores, el cual fue evaluado por jurados expertos bajo el sistema de doble ciego, tanto en contenido como en forma. Asimismo, se llevó a cabo un análisis del método de investigación, paradigma y enfoque; a partir de la matriz epistémica adoptada por los autores, utilizando las normas APA, Séptima Edición y el proceso de antiplagio en línea turnitinedu para asegurar que la obra fuera científica.

## DEDICATORIA

Dedico a mi familia de manera especial A mis Hijos Matthew Moysés y Mateo.

*Moises*

Para mis hijos, mi mejor lección y mi mayor motivo. Cada página de este libro está escrita pensando en el mundo que sueño para ustedes: un mundo donde aprendan con amor, haga preguntas sin miedo, persigan sus sueños y crezcan siendo buenas personas. Que estas páginas les recuerden siempre que estudiar abre caminos, que educar es también una forma de amar y que nunca debemos dejar de aprender. Creo firmemente en el poder de la educación para transformar vidas y construir un futuro mejor. Y si algún día dudan de ustedes mismos, recuerden que siempre habrá alguien que creyó en ustedes desde el principio. Los amo con todo mi corazón.

*Amanda*

Dedico este libro, primeramente, a Dios, a mi Patroncito San Miguel, a mi Virgencita de Guadalupe y a mis hijos Scarlett Doménica, Miller gracias por estar conmigo en cada paso que doy y ser mi motivación cuando más lo necesito, cada logro alcanzado es por ustedes, y en especial a mi angelita del cielo que siempre cuida de mí... Mi Princesa. Megitan.

*Andrea*

Dedico este libro con profundo amor y gratitud a mi nieto Benjamín, cuya llegada llenó mi corazón de una nueva ternura y me inspira a seguir soñando y dejando huellas. A mis hijos, Adriana y Nicolás, mi orgullo y uno de los regalos más grandes de la vida, por su amor, comprensión y apoyo constante. Cada logro lleva una parte de ustedes y representa también la fuerza que me impulsa a no rendirme.

*Alexandra*

## PROLOGO

Este libro nació de una frustración y de una convicción. La frustración se fue gestando durante años de transitar simultáneamente dos mundos que se miran con recelo mutuo: el laboratorio de neuroimagen, donde los datos sobre el cerebro infantil se acumulan con una velocidad que desborda la capacidad de asimilación de cualquier investigador individual, y el aula de educación básica, donde docentes extraordinariamente comprometidos toman cada día cientos de decisiones pedagógicas sin disponer de un marco conceptual que conecte lo que hacen con lo que ocurre en el órgano del que depende todo lo que intentan lograr. La convicción, más lenta en cristalizar, fue tomando forma a medida que comprobaba, en seminarios de formación docente en Quito y en Bogotá, en escuelas rurales del altiplano y en colegios urbanos de Santiago, que cuando un maestro comprende por qué un niño de siete años no puede inhibir una respuesta impulsiva, o por qué la ansiedad ante un examen puede borrar temporalmente conocimientos que el alumno demostró poseer la víspera, o por qué veinte minutos de actividad física antes de una clase de matemáticas producen efectos mensurables sobre el rendimiento, algo cambia en su mirada profesional. No se trata de un cambio espectacular ni de una transformación instantánea; se trata de un desplazamiento sutil pero profundo desde la intuición hacia la comprensión, desde la receta hacia el principio, desde el "esto funciona porque lo he visto" hacia el "esto funciona porque sabemos qué ocurre en el cerebro cuando lo hacemos así". Ese desplazamiento, multiplicado por miles de docentes a lo largo de años de ejercicio profesional, tiene el potencial de modificar la experiencia educativa de millones de niños. La ambición de contribuir a ese desplazamiento es lo que justifica la existencia de estas páginas.

Debo confesar que durante mucho tiempo dudé de la pertinencia de añadir un volumen más a la ya considerable bibliografía sobre neuroeducación. La última década ha visto proliferar manuales, guías y compilaciones que abordan la relación entre cerebro y aprendizaje desde perspectivas diversas, y algunos de ellos son genuinamente valiosos. Tres razones terminaron por inclinar la balanza. La primera es temporal: la investigación en neurociencia cognitiva del desarrollo se mueve con tal celeridad que obras publicadas hace apenas cinco o seis años presentan un panorama incompleto en áreas que han experimentado avances sustanciales. Los estudios del consorcio ABCD sobre el desarrollo cerebral adolescente, las investigaciones sobre el papel de los astrocitos en la consolidación de la memoria, los metaanálisis recientes sobre los efectos de la actividad física en las funciones ejecutivas infantiles, los datos longitudinales sobre la emergencia del área de la forma visual de las palabras durante el

aprendizaje de la lectura, las revisiones sistemáticas sobre la prevalencia de neuromitos en docentes latinoamericanos: todo ello ha transformado el terreno lo suficiente como para exigir una síntesis actualizada.

La segunda razón es geográfica y cultural. La mayor parte de la producción editorial en neuroeducación proviene del mundo anglosajón y asume, implícita o explícitamente, contextos escolares, marcos curriculares y realidades socioeconómicas que no coinciden con las que enfrenta un docente de educación básica en Latinoamérica. Un maestro que trabaja con cuarenta alumnos en un aula sin ventilación adecuada, donde varios niños llegan sin desayunar y algunos cargan el peso de situaciones familiares que el término "estrés tóxico" describe con precisión clínica, necesita algo más que la traducción de recomendaciones pensadas para aulas de veinte alumnos en escuelas con recursos abundantes. No porque los principios neurocientíficos varíen de un continente a otro la potenciación a largo plazo opera igual en el hipocampo de un niño de Guayaquil que en el de uno de Helsinki, sino porque la traducción pedagógica de esos principios debe considerar las condiciones materiales, institucionales y culturales en las que la enseñanza tiene lugar. Este libro no pretende ofrecer una neuroeducación exclusivamente latinoamericana, pretensión que carecería de sentido dado el carácter universal de los mecanismos neurobiológicos, pero sí procura que los ejemplos, las orientaciones prácticas y la sensibilidad hacia las restricciones del contexto reflejen la realidad de los sistemas educativos en los que la mayoría de sus lectores trabajan.

La tercera razón tiene que ver con el tono. He observado con preocupación creciente que una parte de la literatura divulgativa en neuroeducación ha adoptado un registro que oscila entre el entusiasmo acrítico y la prescripción dogmática, como si la neurociencia hubiese descubierto la fórmula definitiva del aprendizaje y solo faltara que los docentes la aplicaran. Esa actitud, que algunos autores han denominado "neurofilia", produce dos daños simultáneos. Alimenta expectativas que la ciencia no puede satisfacer, generando una inevitable decepción que refuerza el escepticismo de quienes ya desconfiaban de la empresa neuroeducativa. Y, peor aún, sustituye el juicio profesional del docente por una obediencia irreflexiva a supuestos dictados del cerebro, como si el escáner pudiera reemplazar la experiencia pedagógica acumulada, el conocimiento del contexto local y la sensibilidad hacia la singularidad de cada alumno. La posición epistemológica de este libro se sitúa en las antípodas de esa actitud. La neurociencia informa la pedagogía; no la suplanta. Ofrece restricciones ciertas prácticas son incompatibles con lo que sabemos sobre el funcionamiento cerebral y posibilidades ciertas condiciones

favorecen procesos neurocognitivos específicos, pero no genera prescripciones unívocas. El paso de la evidencia neurocientífica a la decisión pedagógica requiere siempre una mediación que involucre conocimiento disciplinar, experiencia profesional, comprensión del contexto y deliberación ética. Reducir ese proceso complejo a una lista de "tips basados en el cerebro" es traicionar simultáneamente a la neurociencia y a la educación.

Permítaseme un apunte autobiográfico que quizá ilumine el enfoque adoptado en estas páginas. Mi formación doctoral transcurrió en laboratorios donde las neuronas y las sinapsis eran el objeto de estudio, y donde las preguntas de investigación se formulaban en términos de receptores, neurotransmisores y señales hemodinámicas. Los años de trabajo posdoctoral en psicología del desarrollo me obligaron a ampliar esa mirada para incluir al niño completo no solo su cerebro, sino su cuerpo, sus emociones, su historia, su entorno y a reconocer que la elegancia de un mecanismo molecular dice poco sobre su relevancia para la experiencia vivida de un ser humano en desarrollo. Fue el contacto prolongado con aulas reales, primero como observador y después como colaborador en proyectos de intervención educativa, lo que terminó de convencerme de que la neurociencia del aprendizaje solo cobra sentido cuando se mide por su capacidad de mejorar lo que ocurre entre un docente y sus alumnos. Los tres mundos el laboratorio, el departamento de psicología del desarrollo, el aula de primaria converge en este libro, y confío en que esa convergencia se refleje en un texto que no sacrifica el rigor científico en aras de la accesibilidad, ni la relevancia pedagógica en aras de la precisión técnica.

Una palabra sobre lo que este libro no es, porque las expectativas mal calibradas son enemigas de la lectura provechosa. No es un manual de neuroanatomía para educadores, aunque sus primeros capítulos exponen los fundamentos neurobiológicos con suficiente detalle para que el lector construya un vocabulario conceptual sólido. No es un catálogo de actividades didácticas listas para usar, aunque cada capítulo incluye orientaciones prácticas que el docente puede adaptar a su contexto. No es una revisión exhaustiva de la literatura neurocientífica sobre cada tema que aborda, aunque las más de quinientas referencias bibliográficas que lo sustentan dan cuenta de un esfuerzo serio por representar el estado del conocimiento. Y, desde luego, no es un libro que prometa revolucionar la educación, porque las revoluciones educativas son procesos colectivos, institucionales y políticos que ningún libro puede desencadenar por sí solo. Lo que sí aspira a ser es un puente: un texto que permita al docente de educación básica dialogar con la ciencia del cerebro desde una posición informada, crítica y profesionalmente útil. Que le permita distinguir entre lo que la neurociencia ha demostrado con solidez y lo que todavía

es hipótesis, entre lo que tiene traducción pedagógica legítima y lo que es neuromito disfrazado de innovación, entre la evidencia y la opinión. Si al terminar de leer este libro un docente es capaz de evaluar con criterio propio la próxima afirmación sobre el cerebro que escuche en un congreso, en una capacitación o en una red social, una parte considerable de su propósito se habrá cumplido.

El recorrido que proponen estos ocho capítulos respeta una lógica que va de lo microscópico a lo macroscópico, de lo molecular a lo ambiental, de la sinapsis al diseño del aula. Los dos primeros capítulos establecen los cimientos neurobiológicos: la arquitectura del sistema nervioso central, los mecanismos celulares del aprendizaje, el desarrollo ontogenético del cerebro infantil, la plasticidad y los períodos sensibles. Los capítulos tercero y cuarto examinan los sistemas neurocognitivos que la escuela más directamente interpela atención, memoria, funciones ejecutivas, emoción y sus trayectorias de desarrollo durante la infancia. El quinto capítulo aplica ese marco a dos dominios curriculares nucleares: la lectoescritura y el pensamiento lógico-matemático. El sexto amplía la perspectiva hacia los moduladores corporales del aprendizaje: movimiento, sueño y nutrición. El séptimo aborda la neurodiversidad y los trastornos del neurodesarrollo. El octavo cierra el arco con el diseño de ambientes de aprendizaje neurocompatibles. Cada capítulo puede leerse de forma independiente, pero la lectura secuencial permite apreciar cómo cada pieza encaja en un argumento progresivo que gana densidad y complejidad a medida que avanza.

Quiero cerrar este prólogo con una reflexión que me ha acompañado durante todo el proceso de escritura y que, creo, define el espíritu de este libro. La neurociencia nos ha enseñado algo que la intuición de los buenos maestros siempre supo pero que ahora podemos articular con precisión biológica: cada niño que se sienta en un aula es un cerebro en construcción, un sistema dinámico cuya arquitectura se está configurando en tiempo real, influido por cada experiencia que vive, cada emoción que experimenta, cada palabra que escucha, cada desafío cognitivo que enfrenta, cada hora de sueño que duerme o deja de dormir, cada alimento que ingiere o que le falta. El docente de educación básica es, lo sepa o no, un arquitecto involuntario de cerebros en desarrollo. La pregunta que este libro plantea no es si esa responsabilidad existe la evidencia no deja margen para la duda, sino qué hace falta para ejercerla con conocimiento, con prudencia y con la humildad que impone saberse interviniendo sobre un sistema cuya complejidad excede, y probablemente siempre excederá, nuestra capacidad de comprensión

total. Si estas páginas logran que algunos docentes se hagan esa pregunta con mayor frecuencia y la respondan con mayor fundamento, el esfuerzo invertido en escribirlas habrá valido la pena.

## ÍNDICE

|                                                                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| DEDICATORIA.....                                                                                                                                                 | vi        |
| PROLOGO.....                                                                                                                                                     | vii       |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                                                                                                                                           | xviii     |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                                                                                               | 1         |
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>                                                                                                                                          | <b>7</b>  |
| <b>Fundamentos neurobiológicos del aprendizaje infantil: del cerebro al aula.....</b>                                                                            | <b>7</b>  |
| Introducción .....                                                                                                                                               | 8         |
| 1.1. El cerebro como órgano del aprendizaje: arquitectura funcional y principios organizativos del sistema nervioso central en la infancia .....                 | 10        |
| 1.2. La neurona y la sinapsis como unidades del procesamiento informativo: de la transmisión electroquímica a la consolidación de representaciones mentales..... | 14        |
| 1.3. Desarrollo ontogenético del cerebro infantil: cronología madurativa de las estructuras corticales y subcorticales entre los 3 y los 12 años.....            | 18        |
| 1.4. Mielinización, poda sináptica y conectividad funcional: los tres procesos que esculpen el cerebro del estudiante de educación básica.....                   | 22        |
| 1.5. Neurotransmisores implicados en el aprendizaje escolar: dopamina, serotonina, noradrenalina y acetilcolina en el contexto del aula .....                    | 26        |
| 1.6. Del dato neurocientífico a la práctica pedagógica: puentes epistemológicos, riesgos de sobreinterpretación y el problema de los neuromitos .....            | 32        |
| 1.7. El cerebro infantil como sistema dinámico: implicaciones para repensar la enseñanza desde la biología .....                                                 | 36        |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>                                                                                                                                          | <b>40</b> |
| <b>Plasticidad cerebral y períodos sensibles: implicaciones para la enseñanza en educación básica.....</b>                                                       | <b>40</b> |
| Introducción .....                                                                                                                                               | 41        |
| 2.1. Plasticidad sináptica: mecanismos de potenciación a largo plazo y depresión sináptica como sustratos del aprendizaje y el olvido .....                      | 41        |

|                                                                                                                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2. Tipos de plasticidad cerebral relevantes para la educación: plasticidad experiencia-expectante, experiencia-dependiente y plasticidad compensatoria.....          | 44        |
| 2.3. Períodos sensibles y períodos críticos: una distinción que transforma la planificación curricular .....                                                           | 47        |
| 2.4. Ventanas de oportunidad para el lenguaje, la numerosidad y las funciones socioemocionales: qué dice la evidencia longitudinal reciente .....                      | 49        |
| 2.5. El mito del "todo se decide antes de los tres años": matizaciones neurocientíficas sobre la capacidad plástica del cerebro escolar entre los 6 y los 12 años..... | 51        |
| 2.6. Plasticidad maladaptativa y estrés tóxico: cuando el entorno erosiona la arquitectura cerebral del estudiante.....                                                | 52        |
| 2.7. Cómo diseñar experiencias de aprendizaje que aprovechen y protejan la capacidad reorganizativa del cerebro infantil .....                                         | 54        |
| 2.8. Cierre del capítulo. La plasticidad como promesa y como responsabilidad docente ...                                                                               | 58        |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>                                                                                                                                                | <b>60</b> |
| <b>Atención, memoria y funciones ejecutivas: pilares neurocognitivos del rendimiento académico.....</b>                                                                | <b>60</b> |
| Introducción .....                                                                                                                                                     | 61        |
| 3.1. Neuroanatomía funcional de la atención: redes atencionales de alerta, orientación y control ejecutivo en el cerebro del niño .....                                | 62        |
| 3.2. La atención en el aula como recurso limitado: implicaciones de la carga cognitiva y la fatiga atencional para la organización de la jornada escolar.....          | 66        |
| 3.3. Sistemas de memoria y aprendizaje escolar: memoria de trabajo, memoria episódica, memoria semántica y memoria procedimental .....                                 | 70        |
| 3.4. De la codificación a la consolidación y la recuperación: cómo el cerebro transforma la experiencia didáctica en conocimiento duradero .....                       | 75        |
| 3.5. Funciones ejecutivas en desarrollo: inhibición, flexibilidad cognitiva y planificación como predictores del éxito académico y social.....                         | 80        |
| 3.6. La corteza prefrontal como última frontera madurativa: por qué los niños de educación básica no aprenden como los adultos.....                                    | 84        |
| 3.7. Estrategias docentes para fortalecer la atención sostenida, la memoria de trabajo y la autorregulación cognitiva en el aula .....                                 | 88        |

|                                                                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.8. Lo que el docente puede y no puede esperar de un cerebro ejecutivamente inmaduro                                                                          | 93         |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b>                                                                                                                                        | <b>99</b>  |
| <b>Emociones y aprendizaje: el papel del sistema límbico en la motivación escolar .....</b>                                                                    | <b>99</b>  |
| Introducción .....                                                                                                                                             | 100        |
| 4.1. Neurobiología de la emoción: amígdala, corteza orbitofrontal, ínsula y circuitos de valoración afectiva .....                                             | 102        |
| 4.2. La hipótesis del marcador somático y su aplicación a la toma de decisiones en el contexto escolar .....                                                   | 108        |
| 4.3. Emoción y cognición como procesos inseparables: evidencia desde la neuroimagen funcional sobre el aprendizaje emocionalmente significativo .....          | 111        |
| 4.4. Circuitos de recompensa, dopamina y motivación intrínseca: qué activa y qué apaga el deseo de aprender en el cerebro infantil .....                       | 115        |
| 4.5. El estrés académico y su impacto sobre el eje hipotalámico-hipofisario-adrenal: cortisol, memoria y rendimiento escolar.....                              | 119        |
| 4.6. Regulación emocional en la infancia: desarrollo de la capacidad autorregulatoria y su relación con el clima de aula.....                                  | 122        |
| 4.7. Aprendizaje socioemocional con base neurocientífica: programas, evidencia de eficacia y criterios de implementación en educación básica .....             | 126        |
| 4.8. Un aula que entiende las emociones es un aula que posibilita el aprendizaje profundo .....                                                                | 130        |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b>                                                                                                                                        | <b>132</b> |
| <b>Estrategias neurodidácticas para la enseñanza de la lectoescritura y el pensamiento lógico-matemático .....</b>                                             | <b>132</b> |
| Introducción .....                                                                                                                                             | 133        |
| 5.1. El cerebro lector: circuitos neuronales de la lectura, el modelo de doble ruta y la hipótesis del reciclaje neuronal de Dehaene .....                     | 133        |
| 5.2. Conciencia fonológica, principio alfabético y fluidez lectora: bases neurocognitivas y secuencia didáctica fundamentada .....                             | 136        |
| 5.3. De la decodificación a la comprensión: procesos inferenciales, memoria de trabajo verbal y construcción de modelos situacionales durante la lectura ..... | 139        |

|                                                                                                                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4. La escritura como proceso neurocognitivo complejo: coordinación grafomotora, planificación discursiva y revisión metacognitiva .....                                | 141        |
| 5.5. El cerebro matemático: representación de la numerosidad, sentido numérico aproximado y el papel del surco intraparietal .....                                       | 144        |
| 5.6. Del conteo a la aritmética y del razonamiento concreto al abstracto: trayectorias neurocognitivas del pensamiento lógico-matemático entre los 5 y los 12 años ..... | 146        |
| 5.7. Dificultades específicas de aprendizaje en lectura y matemáticas: dislexia y discalculia desde la perspectiva neurocognitiva .....                                  | 149        |
| 5.8. Orientaciones neurodidácticas concretas: secuencias, materiales y dinámicas de aula para la lectoescritura y las matemáticas basadas en evidencia cerebral .....    | 151        |
| 5.9. Cierre del capítulo. Enseñar a leer y a calcular es dialogar con la arquitectura funcional del cerebro.....                                                         | 155        |
| <b>CAPÍTULO 6 .....</b>                                                                                                                                                  | <b>157</b> |
| <b>El movimiento, el sueño y la nutrición como moduladores del aprendizaje: Evidencia neurocientífica para la práctica docente .....</b>                                 | <b>157</b> |
| Introducción .....                                                                                                                                                       | 158        |
| 6.1. Actividad física y cerebro: efectos del ejercicio aeróbico sobre la neurogénesis hipocampal, el BDNF y las funciones ejecutivas en la infancia.....                 | 158        |
| 6.2. Movimiento integrado en el aula: descansos activos, aprendizaje corporizado y su impacto sobre la atención y la retención en contextos escolares .....              | 161        |
| 6.3. Neurociencia del sueño infantil: arquitectura del sueño, consolidación de la memoria dependiente del sueño y ritmos circadianos en la edad escolar .....            | 163        |
| 6.4. Privación de sueño y rendimiento académico: evidencia epidemiológica y mecanismos neurobiológicos subyacentes .....                                                 | 165        |
| 6.5. Nutrición y función cerebral: glucosa, ácidos grasos omega-3, hierro, zinc y micronutrientes vinculados al neurodesarrollo y la cognición escolar .....             | 167        |
| 6.6. El desayuno escolar, la hidratación y los patrones alimentarios como variables de intervención educativa: evidencia y políticas públicas .....                      | 169        |
| 6.7. Hacia una pedagogía del cuerpo: integrar movimiento, sueño y nutrición en la planificación docente y la política institucional.....                                 | 171        |
| 6.8. El cerebro no aprende solo con la mente: el cuerpo como condición de posibilidad del rendimiento cognitivo .....                                                    | 174        |

## **CAPÍTULO 7 .....175**

### **Neurodiversidad en el aula: abordajes neuroeducativos para la atención a la diversidad funcional y los trastornos del neurodesarrollo .....175**

Introducción ..... 176

7.1. El paradigma de la neurodiversidad: fundamentos conceptuales, tensiones terminológicas y consecuencias para la práctica inclusiva ..... 176

7.2. Trastorno por déficit de atención con hiperactividad: neurobiología de los circuitos frontoestriatales, heterogeneidad fenotípica y estrategias de apoyo en el aula..... 179

7.3. Trastorno del espectro autista: conectividad cerebral atípica, procesamiento sensorial diferenciado y diseño de entornos escolares accesibles..... 181

7.4. Dificultades específicas del aprendizaje más allá de la dislexia y la discalculia: disgrafía, trastorno del procesamiento auditivo y perfiles neurocognitivos mixtos ..... 184

7.5. Altas capacidades intelectuales: mitos neurocientíficos, características reales de la organización cerebral y necesidades educativas frecuentemente desatendidas ..... 186

7.6. El cerebro bilingüe y multilingüe en contextos de diversidad lingüística: ventajas ejecutivas, costes de procesamiento y orientaciones para aulas plurilingües ..... 188

7.7. Diseño universal para el aprendizaje como marco neuroeducativo: principios, redes cerebrales implicadas y aplicación curricular ..... 190

7.8. Cierre del capítulo. La diversidad cerebral como norma y no como excepción: reconfigurar la mirada docente ..... 192

## **CAPÍTULO 8 .....194**

### **Diseño de ambientes de aprendizaje neurocompatibles: del mobiliario al currículo basado en el cerebro..... 194**

Introducción ..... 195

8.1. ¿Qué es un ambiente neurocompatible? Definición operativa, criterios de diseño y evidencia disponible sobre el efecto del entorno físico en la cognición infantil ..... 195

8.2. Iluminación, acústica, temperatura y calidad del aire: variables ambientales con impacto documentado sobre la atención y el procesamiento cognitivo..... 197

8.3. Organización espacial del aula: disposición del mobiliario, zonas de trabajo diferenciadas y el concepto de flexibilidad espacial para el aprendizaje activo ..... 199

|                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.4. El color, los estímulos visuales y el nivel de complejidad perceptiva del aula: entre la estimulación óptima y la sobrecarga sensorial.....                                           | 201 |
| 8.5. Tecnología educativa y cerebro: pantallas, tiempo de exposición, multitarea digital y el debate sobre los efectos neurocognitivos del uso de dispositivos en la infancia.....         | 203 |
| 8.6. Diseño curricular neurocompatible: secuenciación didáctica basada en ciclos atencionales, espaciado de la práctica, intercalado y recuperación activa.....                            | 205 |
| 8.7. La evaluación desde la neuroeducación: formatos de evaluación coherentes con los mecanismos cerebrales de consolidación y transferencia del conocimiento .....                        | 208 |
| 8.8. Formación docente en neuroeducación: competencias necesarias, riesgos de la divulgación superficial y criterios para distinguir evidencia científica de pseudociencia educativa ..... | 209 |
| 8.9. Cierre del capítulo y del libro. El compromiso de una educación informada por la ciencia del cerebro: responsabilidad epistémica y horizonte pedagógico.....                          | 212 |
| Referencias bibliográficas.....                                                                                                                                                            | 214 |
| ACERCA DE LOS AUTORES .....                                                                                                                                                                | 259 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                  |                                                                          |     |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 1</b>  | Organización macroscópica y lobular del cerebro infantil.....            | 10  |
| <b>Figura 2</b>  | Estructura de la neurona y microestructura de la sinapsis.....           | 15  |
| <b>Figura 3</b>  | Secuencia madurativa cortical entre los 3 y los 12 años .....            | 19  |
| <b>Figura 4</b>  | Representación neural de la lectura y el sentido numérico .....          | 23  |
| <b>Figura 5</b>  | Evolución de la conectividad funcional (Local a Distribuida).....        | 27  |
| <b>Figura 6</b>  | Mecanismo de Potenciación a Largo Plazo (LTP) .....                      | 42  |
| <b>Figura 7</b>  | Tipos de plasticidad cerebral en el desarrollo .....                     | 45  |
| <b>Figura 8</b>  | Ventanas de oportunidad y períodos sensibles .....                       | 47  |
| <b>Figura 9</b>  | Efecto del estrés tóxico en la arquitectura cerebral .....               | 53  |
| <b>Figura 10</b> | Ciclo de retroalimentación de la plasticidad y la práctica.....          | 55  |
| <b>Figura 11</b> | Procesamiento de recompensa y plasticidad experiencia-dependiente .....  | 57  |
| <b>Figura 12</b> | Decálogo didáctico de protección y estimulación plástica.....            | 59  |
| <b>Figura 13</b> | Redes atencionales de Posner en el cerebro infantil.....                 | 63  |
| <b>Figura 14</b> | Carga cognitiva y fatiga atencional durante la jornada .....             | 67  |
| <b>Figura 15</b> | Taxonomía de los sistemas de memoria .....                               | 70  |
| <b>Figura 16</b> | Modelo de memoria de trabajo de Baddeley y Hitch.....                    | 72  |
| <b>Figura 17</b> | Fases del procesamiento de la memoria (Codificación a Recuperación)..... | 76  |
| <b>Figura 18</b> | Componentes de las Funciones Ejecutivas.....                             | 80  |
| <b>Figura 19</b> | Inmadurez de la corteza prefrontal y autorregulación.....                | 84  |
| <b>Figura 20</b> | Estrategias docentes para el andamiaje ejecutivo.....                    | 89  |
| <b>Figura 21</b> | Anatomía del Sistema Límbico y circuitos afectivos .....                 | 102 |
| <b>Figura 22</b> | Mecanismo de la Hipótesis del Marcador Somático .....                    | 108 |
| <b>Figura 23</b> | Interacción bidireccional entre Emoción y Cognición .....                | 112 |

|                  |                                                                           |     |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 24</b> | El Circuito de Recompensa y la Dopamina.....                              | 115 |
| <b>Figura 25</b> | El Eje Hipotalámico-Hipofisario-Adrenal (HHA) y el Estrés.....            | 119 |
| <b>Figura 26</b> | Trayectoria de desarrollo de la Regulación Emocional.....                 | 122 |
| <b>Figura 27</b> | Componentes del Aprendizaje Socioemocional (SEL) .....                    | 126 |
| <b>Figura 28</b> | El Clima de Aula Neurocompatible.....                                     | 130 |
| <b>Figura 29</b> | El Modelo de Doble Ruta de la Lectura .....                               | 134 |
| <b>Figura 30</b> | El Reciclaje Neuronal del Área de la Forma Visual de la Palabra .....     | 137 |
| <b>Figura 31</b> | Circuito neural de la lectura en desarrollo.....                          | 139 |
| <b>Figura 32</b> | Procesamiento neurocognitivo de la escritura.....                         | 142 |
| <b>Figura 33</b> | El Circuito del Sentido Numérico y el Surco Intraparietal .....           | 144 |
| <b>Figura 34</b> | Transición de la aritmética concreta a la abstracta .....                 | 147 |
| <b>Figura 35</b> | Bases neurobiológicas de la Dislexia y la Discalculia .....               | 149 |
| <b>Figura 36</b> | Secuencia didáctica neurofavorable para lectoescritura y matemáticas..... | 152 |
| <b>Figura 37</b> | Impacto del ejercicio físico en la neurogénesis y el BDNF .....           | 159 |
| <b>Figura 38</b> | Efecto de los Descansos Activos en las Redes de Atención.....             | 161 |
| <b>Figura 39</b> | Arquitectura del sueño infantil y consolidación de la memoria .....       | 163 |
| <b>Figura 40</b> | Efectos neurobiológicos de la privación de sueño .....                    | 165 |
| <b>Figura 41</b> | Nutrientes clave para el neurodesarrollo escolar.....                     | 167 |
| <b>Figura 42</b> | Efectos de la hidratación y el glucosa sanguínea en la atención .....     | 170 |
| <b>Figura 43</b> | El concepto de Aprendizaje Corporizado (Embodied Cognition).....          | 172 |
| <b>Figura 44</b> | Decálogo de la "Pedagogía del Cuerpo" institucional.....                  | 173 |
| <b>Figura 45</b> | El Paradigma de la Neurodiversidad .....                                  | 177 |
| <b>Figura 46</b> | Neurobiología de los circuitos frontoestriatales en el TDAH .....         | 179 |
| <b>Figura 47</b> | Conectividad atípica y procesamiento sensorial en el TEA .....            | 182 |
| <b>Figura 48</b> | Perfiles neurocognitivos de la Disgrafía y el TPA .....                   | 184 |

|                  |                                                                  |     |
|------------------|------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 49</b> | Organización cerebral en Altas Capacidades Intelectuales .....   | 186 |
| <b>Figura 50</b> | Redes cerebrales del cerebro Bilingüe .....                      | 189 |
| <b>Figura 51</b> | Factores ambientales con impacto neurocognitivo en el aula ..... | 196 |
| <b>Figura 52</b> | Zonificación y flexibilidad del espacio neurocompatible .....    | 200 |
| <b>Figura 53</b> | Carga de estimulación visual y nivel perceptivo .....            | 202 |
| <b>Figura 54</b> | Efecto de las pantallas y la multitarea en el desarrollo .....   | 203 |
| <b>Figura 55</b> | Efecto de las pantallas y la multitarea en el desarrollo .....   | 205 |
| <b>Figura 56</b> | Evaluación coherente con la memoria y la consolidación .....     | 208 |

## INTRODUCCIÓN

Escribir un libro sobre neuroeducación en la tercera década del siglo XXI obliga a quien lo intenta a situarse en una encrucijada incómoda. Por un lado, la investigación en neurociencia cognitiva del desarrollo ha alcanzado un volumen y una sofisticación metodológica sin precedentes: las técnicas de neuroimagen funcional permiten observar la actividad cerebral de un niño mientras lee, calcula o regula una emoción; los estudios longitudinales con miles de participantes están revelando las trayectorias madurativas de regiones corticales y subcorticales con una resolución temporal que hace dos décadas era impensable; la genómica, la epigenética y la neurobiología molecular han comenzado a dibujar los mecanismos por los cuales la experiencia, incluida la experiencia escolar, modifica la estructura y la función del cerebro en desarrollo. Por otro lado, la distancia entre ese cuerpo de conocimiento y lo que ocurre cada mañana en las aulas de educación básica sigue siendo, con demasiada frecuencia, un abismo. El docente que busca orientaciones basadas en la ciencia del cerebro se encuentra, las más de las veces, con dos tipos de oferta igualmente insatisfactorias: la simplificación divulgativa que convierte hallazgos complejos en eslóganes pedagógicos sin matices, o la publicación especializada cuyo lenguaje y nivel de abstracción la hacen inaccesible para quien no posee formación en neurociencias. Entre la receta trivial y el artículo hermético hay un territorio que este libro aspira a habitar.

La aspiración no es nueva ni exclusiva de esta obra. Desde que Bruer publicó en 1997 su célebre advertencia sobre el puente demasiado lejano entre la neurociencia y la educación, un número creciente de investigadores ha trabajado para acortar esa distancia sin falsificarla. Los trabajos de Tokuhamu-Espinosa, Dehaene, Immordino-Yang, Diamond y Howard-Jones, entre otros, han demostrado que es posible construir un discurso que sea al mismo tiempo riguroso en su tratamiento de la evidencia neurocientífica y relevante para la toma de decisiones pedagógicas. Este libro se inscribe en esa tradición, pero lo hace con una especificidad deliberada: su foco no es la neuroeducación en abstracto ni la neurociencia del aprendizaje como disciplina académica, sino las implicaciones concretas que el conocimiento actual sobre el cerebro infantil tiene para el docente de educación básica, entendida como la etapa educativa que abarca aproximadamente desde los seis hasta los doce años en la mayoría de los sistemas escolares iberoamericanos. Esta delimitación no es arbitraria. El rango etario de la educación básica coincide con un período del desarrollo cerebral extraordinariamente dinámico: la mielinización de los tractos de sustancia blanca que conectan regiones corticales distantes avanza con rapidez desigual según la región; la poda sináptica elimina conexiones redundantes

mientras consolida las que el uso ha fortalecido; la corteza prefrontal, sede de las funciones ejecutivas que la escuela tanto demanda y tan poco comprende, apenas ha iniciado una maduración que no culminará hasta bien entrada la tercera década de vida. Comprender estas coordenadas neurobiológicas no convierte al docente en neurocientífico, pero le proporciona un marco interpretativo que puede transformar su manera de entender por qué un alumno no logra mantener la atención durante cuarenta minutos, por qué otro recuerda vívidamente una actividad y olvida otra al día siguiente, o por qué la regulación emocional de un niño de siete años no puede evaluarse con los mismos criterios que la de un adulto.

El título del libro enuncia con precisión su propósito: neuroeducación aplicada al aula de educación básica. El adjetivo "aplicada" merece una aclaración que evite malentendidos. No significa que cada hallazgo neurocientífico tenga una traducción directa e inmediata en una técnica de enseñanza; la historia reciente de la neuroeducación está plagada de extrapolaciones apresuradas que han generado neuromitos persistentes y prácticas pedagógicas sin fundamento. Lo que "aplicada" significa aquí es que la exposición de los fundamentos neurocientíficos se realiza siempre con la mirada puesta en el aula, preguntándose qué implicaciones tiene cada dato para la organización de la jornada escolar, el diseño de las actividades, la secuenciación de los contenidos, la gestión emocional del grupo o la evaluación del aprendizaje. La dirección del razonamiento no va del laboratorio al pupitre de manera lineal, como si la neurociencia dictara lo que el docente debe hacer; va del laboratorio al pupitre pasando por la reflexión pedagógica, la validación ecológica y el juicio profesional del educador. El cerebro no prescribe currículos, pero la ignorancia sobre su funcionamiento condena al docente a trabajar a ciegas sobre el órgano del que depende todo lo que intenta lograr.

La estructura del libro refleja una lógica acumulativa que conviene explicitar para que el lector pueda recorrerla con provecho. Los ocho capítulos avanzan desde los cimientos neurobiológicos hasta las aplicaciones más específicas, de modo que cada capítulo presupone los anteriores y prepara los siguientes. El primer capítulo establece las bases neurobiológicas del aprendizaje infantil: la organización del sistema nervioso central, la neurona y la sinapsis como unidades funcionales, los mecanismos de potenciación y depresión sináptica que constituyen el sustrato celular del aprendizaje, y el desarrollo ontogenético del cerebro entre los tres y los doce años con sus tres grandes procesos rectores: mielinización, poda sináptica y reorganización de la conectividad funcional. Cierra con una reflexión epistemológica sobre los riesgos simétricos de la sobreinterpretación y el rechazo preventivo de la neurociencia en el ámbito educativo, una tensión que reaparece a lo largo de todo el libro porque constituye, en

mi opinión, el desafío intelectual más serio que enfrenta cualquier proyecto neuroeducativo honesto.

El segundo capítulo profundiza en la plasticidad cerebral y los períodos sensibles, dos conceptos que la divulgación ha popularizado pero que la investigación ha complejizado considerablemente en los últimos años. La distinción entre plasticidad experiencia-expectante y experiencia-dependiente, la diferencia entre períodos críticos y períodos sensibles, la evidencia longitudinal sobre las ventanas de oportunidad para el lenguaje, la cognición numérica y las competencias socioemocionales, y la plasticidad maladaptativa que el estrés tóxico puede producir en el cerebro escolar son los ejes de un capítulo que busca proporcionar al docente una comprensión matizada de la capacidad reorganizativa del cerebro, alejada tanto del optimismo ingenuo que proclama que "todo es posible si se estimula a tiempo" como del fatalismo determinista que asume que la biología fija destinos inamovibles.

Los capítulos tercero y cuarto abordan los pilares neurocognitivos del rendimiento académico y su dimensión emocional, respectivamente. El tercero examina la atención, la memoria y las funciones ejecutivas como sistemas interrelacionados cuyas trayectorias de desarrollo condicionan lo que un niño puede y no puede hacer en cada momento de su escolaridad. La inmadurez de la corteza prefrontal, la variabilidad intraindividual en el funcionamiento ejecutivo, la capacidad limitada de la memoria de trabajo infantil y las implicaciones de estos datos para la organización de la enseñanza constituyen el núcleo de un capítulo que pretende ofrecer al docente herramientas conceptuales para calibrar sus expectativas y diseñar andamiajes cognitivos que respeten la realidad neurobiológica de sus alumnos sin renunciar a expandirla gradualmente. El cuarto capítulo desmonta la separación cartesiana entre emoción y cognición para mostrar, con evidencia neurocientífica convergente, que los circuitos emocionales participan activamente en cada fase del aprendizaje. La amígdala, la corteza orbitofrontal, la ínsula, los circuitos dopaminérgicos de recompensa, el eje hipotalámico-hipofisario-adrenal y las redes prefrontales de regulación emocional no son componentes accesorios del aprendizaje sino engranajes funcionales sin los cuales la maquinaria cognitiva no opera. Las implicaciones para el clima emocional del aula, la motivación intrínseca y los programas de aprendizaje socioemocional se derivan naturalmente de ese recorrido neurobiológico.

El quinto capítulo desciende al terreno de los contenidos curriculares para examinar las estrategias neurodidácticas que la evidencia respalda en dos dominios centrales de la educación básica: la lectoescritura y el pensamiento lógico-matemático. Los circuitos corticales de la lectura, el reciclaje neuronal de la región occipitotemporal ventral para convertirse en el área

de la forma visual de las palabras, la arquitectura cerebral del sentido numérico, la transición del cálculo dependiente del hipocampo al cálculo automatizado que recluta el surco intraparietal, la dislexia y la discalculia como ventanas privilegiadas para entender las bases neurales de estos aprendizajes: cada uno de estos temas se traduce en orientaciones didácticas que buscan tender un puente entre lo que sabemos sobre cómo el cerebro procesa el lenguaje escrito y la cantidad, y lo que el docente puede hacer para facilitar esos procesamiento en el aula.

El sexto capítulo amplía la mirada más allá de la instrucción directa para examinar tres moduladores biológicos del aprendizaje que la escuela frecuentemente trata como asuntos periféricos pero que la neurociencia ha documentado como condiciones de posibilidad del rendimiento cognitivo: el movimiento, el sueño y la nutrición. Un niño que no duerme lo suficiente, que no se alimenta adecuadamente o que permanece inmóvil durante horas carece de las condiciones neurobiológicas básicas para que las mejores estrategias didácticas surtan efecto. Su corteza prefrontal opera con un suministro subóptimo de neurotransmisores y neurotrofinas; su hipocampo no ha podido consolidar las memorias del día anterior; sus circuitos atencionales fluctúan entre la somnolencia y la hiperactivación reactiva. La evidencia que sustenta estas afirmaciones proviene de ensayos controlados aleatorizados, metaanálisis y estudios con neuroimagen funcional que han acumulado, especialmente en el último lustro, un volumen de datos suficiente para reclamar la atención de cualquier profesional de la educación que se tome en serio la optimización del aprendizaje.

El séptimo capítulo aborda la neurodiversidad como realidad cotidiana del aula y como marco conceptual que la neurociencia contemporánea ha consolidado con evidencia robusta. No existe un cerebro estándar, y la variabilidad en la arquitectura y el funcionamiento neural no es la excepción sino la norma estadística. Los circuitos frontoestriatales implicados en el TDAH, la conectividad atípica del espectro autista, las dificultades específicas del aprendizaje frecuentemente invisibilizadas, las necesidades desatendidas de los alumnos con altas capacidades, los efectos del bilingüismo sobre la organización cerebral y el Diseño Universal para el Aprendizaje como propuesta integradora conforman un capítulo que pretende desplazar la mirada docente desde el déficit hacia la diversidad funcional, comprendiendo qué ocurre en el cerebro de cada alumno para poder responder con estrategias pedagógicas informadas.

El octavo y último capítulo cierra el arco del libro abordando el diseño de ambientes de aprendizaje neurocompatibles. La pregunta que lo vertebra es operativa: ¿cómo debería configurarse el entorno físico, sensorial, tecnológico, curricular y evaluativo de un aula de educación básica para que sus características sean compatibles con lo que la neurociencia ha

documentado sobre el funcionamiento del cerebro que aprende? El recorrido avanza desde las variables ambientales más tangibles luz, sonido, temperatura, calidad del aire, mobiliario hasta las decisiones pedagógicas menos visibles pero igualmente determinantes: la secuenciación didáctica basada en los principios de la práctica espaciada y la recuperación activa, los formatos de evaluación coherentes con lo que sabemos sobre la consolidación de la memoria, y la formación del propio docente como condición sine qua non para que todo lo anterior se traduzca en práctica real y sostenida.

Una advertencia de honestidad intelectual recorre estas páginas de principio a fin, y conviene hacerla explícita desde esta introducción para que el lector la tenga presente como criterio de lectura. La neurociencia del aprendizaje es una disciplina joven, y su intersección con la educación es más joven todavía. Muchos de los hallazgos que se discuten en este libro provienen de estudios con muestras limitadas, realizados en condiciones de laboratorio que no siempre replican la complejidad del aula, y con poblaciones que no representan la diversidad sociocultural, lingüística y económica del estudiantado iberoamericano. La crisis de replicabilidad que ha sacudido a la psicología y a la neurociencia en la última década ha obligado a la comunidad científica a ser más cautelosa en sus afirmaciones, y ese espíritu de cautela informa la escritura de este libro. Cuando la evidencia es sólida, se presenta como tal; cuando es prometedora pero preliminar, se señala; cuando es contradictoria, se expone la contradicción en lugar de ocultarla tras una falsa unanimidad. El docente que busque certezas absolutas no las encontrará aquí, porque la ciencia no las ofrece. Lo que sí encontrará es un conjunto de principios fundamentados en la mejor evidencia disponible que le permitirán tomar decisiones pedagógicas más informadas, más reflexivas y más coherentes con la realidad del órgano sobre el que trabaja cada día.

Quiero dirigirme brevemente al lector que tiene este libro entre las manos, porque la forma en que lo lea determinará en gran medida lo que obtenga de él. Si es docente en ejercicio, le pido que lea con una doble atención: una dirigida al contenido neurocientífico, procurando construir un vocabulario conceptual que le permita dialogar con la literatura especializada más allá de este libro, y otra dirigida a su propia práctica, preguntándose constantemente cómo los principios que aquí se exponen se manifiestan en la conducta de sus alumnos, en la dinámica de su aula, en las decisiones que toma cada día y cuyas consecuencias neurobiológicas rara vez tiene oportunidad de considerar. Si es investigador o formador de docentes, espero que encuentre aquí una síntesis actualizada que le sea útil como recurso de consulta y como punto de partida para profundizaciones que este libro, por su alcance panorámico, no puede ofrecer. Si es estudiante de posgrado en educación o en disciplinas afines, le sugiero que no se limite a

recibir la información que estas páginas ofrecen, sino que la someta al escrutinio crítico que toda afirmación científica merece: verifique las fuentes, contraste las interpretaciones, busque los estudios originales cuando algo le parezca demasiado bueno para ser cierto, porque la neuroeducación necesita profesionales que piensen con rigor, no seguidores que repitan consignas.

La educación es, entre todas las empresas humanas, una de las que más directamente interviene sobre el cerebro. Cada clase, cada actividad, cada interacción entre el docente y sus alumnos deja una huella en la arquitectura neural de cerebros que se encuentran en plena construcción. Esta afirmación, que hace tres décadas habría sonado metafórica, es hoy una descripción literal de lo que la neurociencia ha documentado. La potenciación a largo plazo que consolida una sinapsis cuando un niño comprende un concepto, la mielinización que acelera la transmisión en un circuito cuando una habilidad se practica repetidamente, la poda que elimina conexiones que la experiencia no ha reforzado, la liberación de dopamina que marca una experiencia como valiosa y digna de ser recordada, la cascada de cortisol que puede comprometer la función hipocampal cuando el estrés supera cierto umbral: todos estos son procesos reales que ocurren en cerebros reales mientras los niños están sentados en las aulas que nosotros diseñamos, escuchando las explicaciones que nosotros formulamos, realizando las actividades que nosotros proponemos y respondiendo a las evaluaciones que nosotros construimos. La responsabilidad que se desprende de esa comprensión no debería paralizar al docente, sino movilizarlo hacia una práctica más consciente, más fundamentada y más respetuosa con la biología del aprendizaje. Este libro fue escrito con la convicción de que esa movilización es posible, y con la esperanza de contribuir, aunque sea modestamente, a hacerla realidad.

# CAPÍTULO 1

**Fundamentos neurobiológicos del aprendizaje infantil: del cerebro al aula**

## Introducción

Pocas afirmaciones gozan de tanto consenso retórico y tan poca consecuencia práctica como la que sostiene que el aprendizaje ocurre en el cerebro. Docentes, directivos, diseñadores curriculares y responsables de políticas educativas suscribirían esa proposición sin vacilación, y sin embargo, la inmensa mayoría de las decisiones que configuran la experiencia escolar de un niño la duración de las jornadas, la secuenciación de los contenidos, los métodos de evaluación, las estrategias disciplinarias, la distribución del tiempo entre instrucción y movimiento se adoptan sin referencia alguna a lo que la neurociencia ha descubierto sobre cómo el cerebro infantil procesa, consolida y recupera información. Esa brecha entre la aceptación nominal del cerebro como órgano del aprendizaje y la ignorancia operativa de sus principios de funcionamiento constituye uno de los problemas más persistentes y menos atendidos de la educación contemporánea.

El propósito de este capítulo es sentar las bases neurobiológicas que el resto del libro necesita para ser inteligible. No se trata de ofrecer un curso condensado de neuroanatomía ni de convertir al docente en un neurocientífico amateur, sino de construir un vocabulario conceptual compartido que permita, en los capítulos subsiguientes, discutir con precisión por qué ciertas prácticas pedagógicas funcionan mejor que otras, qué ocurre en el cerebro cuando un niño aprende a leer o a resolver una ecuación, y qué condiciones ambientales facilitan o entorpecen los procesos neurocognitivos sobre los que reposa el rendimiento académico. La aspiración, dicho de otro modo, es que al terminar estas páginas el lector disponga de un mapa necesariamente simplificado, pero no distorsionado de la organización y el desarrollo del cerebro infantil que le permita interpretar la evidencia neuro didáctica con criterio propio en lugar de depender de eslóganes divulgativos.

El recorrido comenzará por la arquitectura general del sistema nervioso central, atendiendo tanto a la organización macroscópica lóbulos, hemisferios, estructuras subcorticales, redes funcionales como a las unidades celulares que la componen, particularmente la neurona y la sinapsis. La descripción de los mecanismos de transmisión sináptica y potenciación a largo plazo proporcionará el fundamento para comprender, ya en términos biológicos concretos, qué significa que un niño "aprenda" algo: qué cambios físicos se producen en su cerebro cuando una representación mental se forma, se refuerza o se pierde. A partir de ese fundamento celular, el capítulo examinará el desarrollo ontogenético del cerebro entre los 3 y los 12 años, el rango etario que cubre la educación básica en la mayoría de los sistemas educativos iberoamericanos, describiendo la cronología madurativa de las estructuras

corticales y subcorticales y los tres grandes procesos que la gobiernan: la mielinización, la poda sináptica y la reorganización de la conectividad funcional.

Una sección dedicada a los sistemas de neurotransmisión abordará la dopamina, la serotonina, la noradrenalina y la acetilcolina no como sustancias aisladas con funciones únicas, sino como moduladores cuya interacción configura los estados neuroquímicos alerta, motivación, calma, curiosidad, estrés sobre los cuales opera la experiencia educativa. La tentación de reducir cada neurotransmisor a una etiqueta simple ("la dopamina del placer", "la serotonina de la felicidad") será resistida explícitamente, porque esas reducciones, además de ser científicamente incorrectas, conducen a recomendaciones pedagógicas tan vagas que resultan inútiles o, lo que es peor, contraproducentes.

El capítulo cerrará con una reflexión epistemológica que considero indispensable antes de avanzar hacia los contenidos aplicados del libro: la cuestión de cómo traducir los hallazgos de la neurociencia al contexto del aula sin incurrir en los dos errores simétricos que amenazan esta empresa. El primero es la sobre interpretación, la importación acrítica de datos de laboratorio a prescripciones pedagógicas sin mediación teórica ni validación ecológica, un error que ha generado la proliferación de neuromitos cuya persistencia entre los docentes está documentada con cifras alarmantes. El segundo es el rechazo preventivo, la actitud de quienes descartan toda contribución de la neurociencia a la educación alegando que la distancia entre el escáner cerebral y el pupitre escolar es insalvable. Entre la ingenuidad del primero y el pesimismo del segundo existe un territorio intermedio riguroso pero fértil, cauto pero constructivo que este libro aspira a habitar.

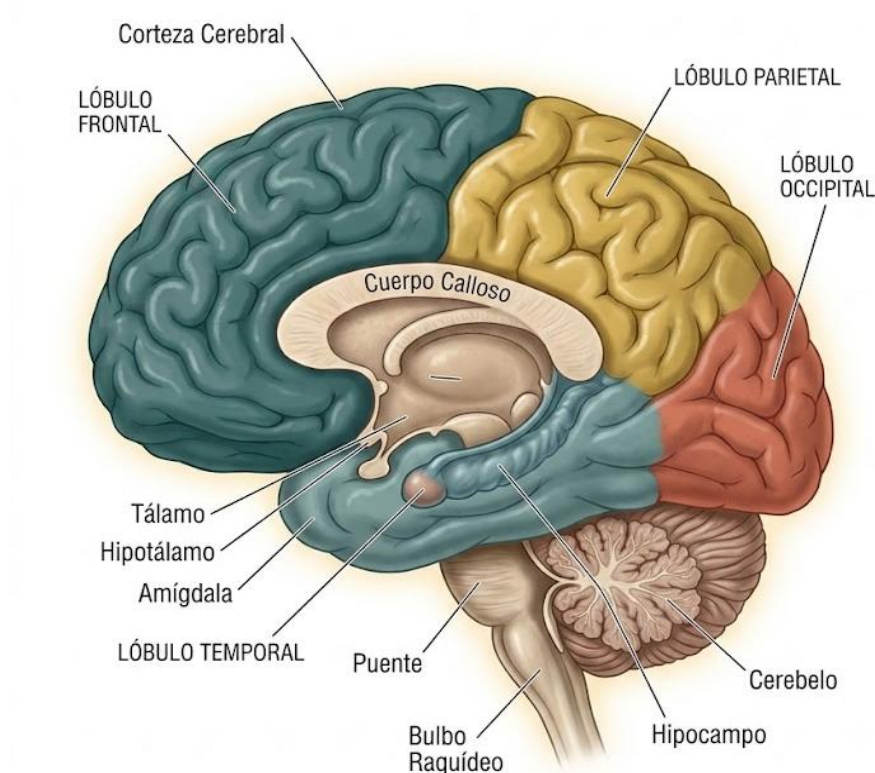
Conviene hacer explícita una decisión metodológica que atraviesa todo el capítulo y, por extensión, todo el libro. La literatura neurocientífica que se cita proviene, en su mayoría, de estudios realizados con técnicas de neuroimagen (resonancia magnética estructural y funcional, tractografía por difusión, electroencefalografía de alta densidad, espectroscopía por resonancia magnética) y de investigación en neurobiología celular y molecular, complementada con estudios comportamentales y de intervención educativa. Cada una de estas técnicas tiene limitaciones que no se ocultarán: la resonancia magnética funcional mide una señal hemodinámica que es un indicador indirecto de la actividad neural; los estudios con muestras pequeñas presentan problemas de generalización que la crisis de replicabilidad ha puesto en evidencia; los modelos animales no siempre son extrapolables al desarrollo humano. Señalar estas limitaciones no equivale a invalidar la evidencia, sino a calibrar su alcance. El docente que comprende tanto lo que la neurociencia ha demostrado como lo que aún ignora

está en mejor posición para tomar decisiones pedagógicas que el que acepta o rechaza los hallazgos sin matices.

### 1.1. El cerebro como órgano del aprendizaje: arquitectura funcional y principios organizativos del sistema nervioso central en la infancia

**Figura 1**

*Organización macroscópica y lobular del cerebro infantil*



Que el aprendizaje reside en el cerebro parece una obviedad, pero las consecuencias de tomarse en serio esa afirmación distan mucho de ser triviales para quien enseña en un aula de educación básica. Si cada concepto nuevo que un niño incorpora, cada habilidad que automatiza, cada emoción que asocia al acto de estudiar se corresponde con una modificación mensurable, física en la organización de sus redes neuronales, entonces la práctica pedagógica es, en un sentido biológico estricto, una intervención sobre la arquitectura cerebral en desarrollo. La responsabilidad que esa idea conlleva merece un examen detenido, y ese examen comienza por comprender cómo está organizado el órgano que aprende.

El sistema nervioso central del ser humano se estructura según un principio jerárquico y, al mismo tiempo, profundamente distribuido. Las regiones filogenéticamente más antiguas el tronco encefálico y el diencefalo sostienen las funciones vitales y los estados de alerta sin

los cuales ningún aprendizaje escolar puede siquiera iniciarse; las estructuras del sistema límbico, particularmente la amígdala y el hipocampo, median la valencia emocional de las experiencias y la formación de memorias declarativas; y la corteza cerebral, con sus áreas sensoriales, motoras y asociativas, posibilita las operaciones cognitivas de orden superior que la escuela demanda con intensidad creciente a medida que el niño avanza de grado. Esta organización no opera como una escalera en la que cada nivel sustituye al anterior, sino como un sistema de circuitos recurrentes donde la información asciende, se procesa y desciende de vuelta para modular la entrada sensorial misma (Kandel et al., 2021). Un docente que alza la voz para captar la atención de un grupo disperso está actuando, sin saberlo, sobre el sistema reticular ascendente y sus proyecciones talamocorticales; el efecto de esa acción dependerá del estado emocional previo del alumno, lo que implica al sistema límbico, y de los recursos atencionales disponibles en su corteza prefrontal, que a los seis años están lejos de su maduración definitiva.

La corteza cerebral humana presenta una superficie aproximada de 2500 centímetros cuadrados plegada en surcos y circunvoluciones que triplican el área disponible respecto de un cerebro liso del mismo volumen. Esa superficie se organiza en seis capas celulares cuya microestructura varía según la región, como describió Brodmann hace más de un siglo, pero cuya conectividad funcional solo hemos comenzado a cartografiar con resolución aceptable gracias a las técnicas de neuroimagen de las dos últimas décadas. Los estudios con resonancia magnética funcional y tractografía por difusión han revelado que el cerebro infantil no es simplemente una versión reducida del cerebro adulto: sus patrones de conectividad presentan diferencias cualitativas. Menon (2023) ha demostrado que las redes de gran escala la red de modo predeterminado, la red de saliencia y la red ejecutiva central muestran un grado de segregación e integración que varía de forma no lineal entre los 5 y los 12 años, un período que coincide exactamente con la educación básica. La implicación directa para el aula es que las demandas cognitivas que un currículo impone a un niño de primer grado activan un patrón de redes cerebrales cualitativamente distinto al que activa en un niño de sexto, aun cuando la tarea superficialmente parezca la misma.

Conviene detenerse en la organización lobular de la corteza porque sus implicaciones pedagógicas son más sutiles de lo que suele reconocerse. El lóbulo frontal, que ocupa aproximadamente un tercio de la superficie cortical, alberga no solo la corteza motora primaria y el área de Broca implicada en la producción del lenguaje, sino también la vasta extensión de la corteza prefrontal, cuyas subdivisiones dorsolateral, ventrolateral, orbitofrontal, medial soportan funciones ejecutivas diferenciadas: la memoria de trabajo, la inhibición de respuestas

prepotentes, la planificación secuencial, la toma de decisiones basada en consecuencias futuras, la regulación emocional voluntaria. Fuster (2015) propuso que la corteza prefrontal funciona como un organizador temporal de la conducta, integrando información del pasado (memoria), del presente (percepción) y del futuro anticipado (planificación) para guiar la acción. Esa integración temporal es, desde luego, exactamente lo que la escuela exige al pedirle a un niño que recuerde una instrucción dada tres minutos antes, la aplique al material que tiene delante y anticipe el paso siguiente de un procedimiento. Que la corteza prefrontal sea la última región en completar su maduración un proceso que se extiende hasta la tercera década de vida, según Tamnes et al. (2017) debería moderar drásticamente las expectativas de autorregulación que los docentes depositan en alumnos de educación básica.

El lóbulo parietal, situado detrás de la cisura central, procesa información somatosensorial y participa en la integración multisensorial, la orientación espacial y el razonamiento cuantitativo. La región del surco intraparietal ha sido identificada por Dehaene (2011) como el correlato neural del sentido numérico, esa capacidad prelingüística para representar magnitudes que constituye el cimiento sobre el cual se construye la aritmética escolar. El lóbulo temporal, por su parte, alberga la corteza auditiva primaria, las áreas de procesamiento lingüístico receptivo (incluida el área de Wernicke en su porción posterior) y, en su cara medial, el hipocampo y la corteza entorrinal, estructuras sin las cuales la formación de memorias declarativas nuevas es imposible, como demostró trágicamente el caso del paciente H.M. estudiado por Scoville y Milner (1957). El lóbulo occipital, finalmente, contiene la corteza visual primaria y las áreas visuales de orden superior que procesan forma, color, movimiento y, de manera especialmente relevante para la lectura, la configuración de los grafemas.

El hemisferio izquierdo y el hemisferio derecho colaboran a través de comisuras, la mayor de las cuales el cuerpo calloso contiene más de 200 millones de fibras axonales cuya mielinización progresiva durante la infancia permite una transferencia interhemisférica cada vez más eficiente. La vieja dicotomía entre un hemisferio "lógico" y otro "creativo" ha sido descartada por la evidencia contemporánea; sin embargo, sí existen asimetrías funcionales relevantes para el aprendizaje escolar: el procesamiento fonológico muestra una lateralización temprana hacia las regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo, mientras que el procesamiento visuoespacial y prosódico tiende a reclutar preferentemente circuitos del hemisferio derecho (Dehaene, 2009). Reducir estas asimetrías a etiquetas simplificadoras empobrece la comprensión; reconocerlas en su complejidad permite, en cambio, anticipar por qué ciertos aprendizajes escolares exigen la coordinación simultánea de redes distribuidas en

ambos hemisferios como ocurre con la comprensión lectora, que requiere decodificación fonológica lateralizada a la izquierda y comprensión inferencial y contextual que recluta regiones derechas y prefrontales bilaterales. Los estudios de Friederici (2017) sobre el procesamiento sintáctico han mostrado que incluso funciones lingüísticas que durante décadas se atribuyeron exclusivamente al hemisferio izquierdo involucran contribuciones del hemisferio derecho, particularmente cuando las oraciones requieren integración de información prosódica y pragmática, como sucede con frecuencia en las explicaciones orales que un docente ofrece en clase.

Un principio organizativo adicional que merece atención es el de la organización topográfica: las representaciones sensoriales y motoras en la corteza conservan una disposición espacial que refleja, aunque de manera distorsionada, la organización del receptor periférico. El homúnculo de Penfield, pese a sus limitaciones, sigue siendo una metáfora útil para entender por qué la experiencia motora y sensorial del niño el tipo de experiencia que la escuela frecuentemente confina al recreo tiene un impacto directo sobre la organización cortical. Los trabajos de Voss et al. (2022) con resonancia magnética estructural en niños de 7 a 10 años han mostrado que las áreas somatosensoriales de la mano presentan mayor grosor cortical en quienes practican escritura manual frecuente en comparación con quienes escriben predominantemente en dispositivos digitales, un hallazgo con implicaciones claras para el debate sobre la digitalización temprana de la escritura. Van der Meer y Van der Weel (2017) corroboraron estos resultados mediante electroencefalografía de alta densidad, demostrando que la escritura a mano genera patrones de activación cortical más ricos y más distribuidos que la escritura en teclado en niños de 12 años, lo cual sugiere que la experiencia motora fina de trazar letras recluta circuitos adicionales de integración sensoriomotora que podrían facilitar la consolidación del aprendizaje ortográfico.

La organización funcional del cerebro infantil no se agota en la descripción de regiones y lóbulos. Las dos últimas décadas han visto un cambio de paradigma en neurociencia cognitiva: el desplazamiento del foco desde las áreas cerebrales hacia las redes funcionales. El cerebro no opera mediante módulos aislados que se "encienden" de uno en uno, sino mediante la coactivación coordinada de regiones distantes que conforman redes de gran escala. Yeo et al. (2011) identificaron siete redes funcionales principales en adultos, y estudios posteriores han documentado su emergencia progresiva durante la infancia. La red frontoparietal, que soporta el control atencional voluntario y la memoria de trabajo, muestra un fortalecimiento progresivo de su conectividad interna entre los 6 y los 14 años (Fair et al., 2009), lo que correlaciona con la mejora gradual en el rendimiento académico que los docentes observan

grado a grado. La comprensión de estas redes transforma la manera de pensar la enseñanza: no se trata de "activar" una región cerebral específica, sino de promover patrones de coactivación entre regiones que faciliten el procesamiento eficiente de la tarea de aprendizaje.

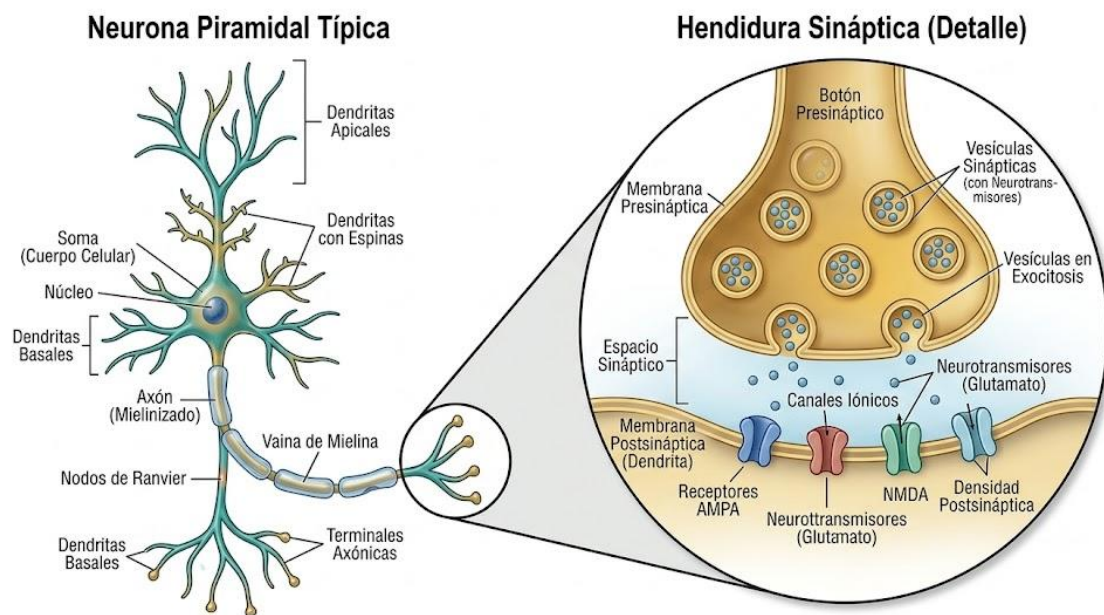
## **1.2. La neurona y la sinapsis como unidades del procesamiento informativo: de la transmisión electroquímica a la consolidación de representaciones mentales**

El cerebro humano contiene aproximadamente 86 mil millones de neuronas, según las estimaciones de Azevedo et al. (2009), cifra que se complementa con un número aún mayor de células gliales cuya participación activa en el procesamiento informativo se ha documentado con creciente robustez en los últimos años. Cada neurona establece entre mil y diez mil conexiones sinápticas con otras neuronas, de modo que el número total de sinapsis en un cerebro infantil sano supera con amplitud el billón. Esa magnitud combinatoria constituye el sustrato material del aprendizaje: aprender, desde la perspectiva de la neurobiología celular, equivale a modificar la fuerza, la estructura o la existencia misma de las conexiones sinápticas entre poblaciones neuronales.

La morfología neuronal presenta una diversidad que a menudo se simplifica en las representaciones esquemáticas de los libros de texto. Las neuronas piramidales de la corteza cerebral, con sus extensas arborizaciones dendríticas apicales y basales, funcionan como las principales unidades excitatorias y constituyen aproximadamente el 80% de la población neuronal cortical. Las interneuronas inhibitorias, aunque minoritarias en número, desempeñan un papel regulador sin el cual la actividad cortical se desorganizaría: las células en cesta, las células candelabro y las células bipolares GABAérgicas esculpen los patrones de actividad excitatoria y generan las oscilaciones rítmicas que coordinan la comunicación entre regiones cerebrales (Tremblay et al., 2016). La maduración de los circuitos inhibitorios durante la infancia es un proceso prolongado cuya importancia para el aprendizaje escolar rara vez se menciona: la capacidad de un niño para filtrar estímulos irrelevantes, mantener una representación mental estable en la memoria de trabajo y alternar entre tareas depende críticamente de la eficiencia de la inhibición cortical mediada por interneuronas GABAérgicas, y esa eficiencia no alcanza niveles adultos hasta la adolescencia (Caballero y Bhatt, 2021). Como se muestra en la figura 2.

**Figura 2**

*Estructura de la neurona y microestructura de la sinapsis*



La transmisión sináptica opera mediante un mecanismo electroquímico cuya elegancia merece una descripción concisa. Cuando un potencial de acción una onda de despolarización eléctrica que recorre el axón a velocidades que pueden alcanzar los 120 metros por segundo en fibras mielinizadas llega a la terminal presináptica, provoca la apertura de canales de calcio dependientes de voltaje. La entrada de iones de calcio desencadena la fusión de vesículas sinápticas con la membrana presináptica y la liberación de neurotransmisores al espacio sináptico, una hendidura de apenas 20 a 40 nanómetros. Esos neurotransmisores se unen a receptores específicos en la membrana postsináptica, generando potenciales excitatorios o inhibitorios que, sumados temporal y espacialmente, determinan si la neurona postsináptica alcanzará su umbral de disparo. La precisión molecular de este proceso contrasta con la vaguedad con la que muchos textos de divulgación neuroeducativa lo describen, y esa vaguedad no es inocua: conduce a metáforas pedagógicas distorsionadas, como la idea de que "las neuronas se conectan cuando el niño está motivado", una simplificación que omite los mecanismos bioquímicos, temporales y estructurales que median entre la experiencia subjetiva de la motivación y el fortalecimiento sináptico.

La integración sináptica es el proceso por el cual una neurona suma los miles de señales excitatorias e inhibitorias que recibe simultáneamente para decidir si dispara o no constituye, a escala celular, un acto computacional de extraordinaria complejidad. Las dendritas no son

meros cables pasivos: estudios recientes han demostrado que los segmentos dendríticos individuales pueden generar potenciales de calcio locales que actúan como unidades computacionales semiautónomas, multiplicando la capacidad de procesamiento de cada neurona de forma que el repertorio computacional del cerebro excede lo que cabría esperar si las neuronas funcionaran como simples sumadores lineales (Gidon et al., 2020). Que una neurona cortical pueda implementar operaciones lógicas complejas en sus dendritas antes de que la señal alcance el soma sugiere que la unidad computacional del cerebro es aún más fina que la neurona individual, un dato que, si bien pertenece a la investigación básica, debería moderar la confianza con que la literatura divulgativa reduce el aprendizaje a "conexiones entre neuronas".

El autor Donald Hebb (1949) propuso, mucho antes de que existieran las herramientas para verificarlo experimentalmente, que cuando dos neuronas se activan repetidamente de forma simultánea, la conexión entre ellas se fortalece. Esta idea, formalizada décadas después mediante el descubrimiento de la potenciación a largo plazo LTP, por sus siglas en inglés en el hipocampo de conejos por Bliss y Lømo (1973), constituye el modelo celular más aceptado para la consolidación sináptica del aprendizaje. La LTP depende de la activación de receptores NMDA, que funcionan como detectores de coincidencia: solo se abren cuando la membrana postsináptica está suficientemente despolarizada y, simultáneamente, el glutamato liberado por la terminal presináptica se une al receptor. La cascada intracelular resultante activa quinasas, promueve la inserción de nuevos receptores AMPA en la membrana y, si la estimulación se repite en intervalos apropiados, desencadena la síntesis de nuevas proteínas que estabilizan el cambio estructural de la sinapsis, transformando una modificación transitoria en una memoria duradera (Kandel et al., 2021).

La distinción entre una LTP temprana, dependiente de modificaciones postraduccionales de proteínas existentes y con una duración de minutos a horas, y una LTP tardía, que requiere transcripción génica y síntesis proteica de novo y puede durar días, semanas o indefinidamente, tiene correspondencias pedagógicas que merecen explicitarse. Cuando un alumno comprende un concepto durante una clase pero lo ha olvidado al día siguiente, lo que probablemente ocurrió es que la LTP temprana la modificación transitoria de las sinapsis implicadas no fue convertida en LTP tardía porque no se dieron las condiciones para la consolidación: no hubo reactivación suficiente del circuito, o la interferencia de aprendizajes posteriores desplazó la representación antes de que se estabilizara. Frey y Morris (1997) propusieron la hipótesis de la "marcación sináptica y captura" (synaptic tagging and capture), según la cual una sinapsis que ha experimentado LTP temprana queda "marcada" y puede

capturar proteínas de plasticidad sintetizadas en respuesta a un evento posterior, incluso si ese evento involucra circuitos diferentes. Esta hipótesis tiene una predicción contraintuitiva para la educación: un evento emocionalmente significativo ocurrido después de una sesión de aprendizaje puede facilitar la consolidación de ese aprendizaje, porque las proteínas de plasticidad sintetizadas en respuesta a la activación emocional pueden ser "capturadas" por las sinapsis marcadas durante la lección. Dunsmoor et al. (2022) proporcionaron evidencia experimental compatible con esta predicción en adultos, y estudios recientes con niños sugieren que el efecto podría ser aún más pronunciado durante la infancia, cuando la plasticidad sináptica es más elevada.

La relevancia de la LTP para la práctica educativa se hace visible con particular claridad cuando se piensa en la repetición espaciada, una de las estrategias de estudio con mayor respaldo empírico. Que un niño repase un contenido tres veces en tres días consecutivos no tiene el mismo efecto sobre la LTP que si lo repasa tres veces distribuidas a lo largo de diez días: el espaciamiento permite ciclos sucesivos de reactivación y reconsolidación que fortalecen las sinapsis implicadas de manera más estable, como han documentado Kang et al. (2022) en un estudio con niños de tercer grado que comparaba esquemas de práctica masiva versus distribuida en el aprendizaje de vocabulario. El cerebro del alumno, pues, no responde a la cantidad bruta de repetición, sino a su distribución temporal, un principio que la organización curricular rara vez incorpora de forma explícita. Cepeda et al. (2006) demostraron en un metaanálisis con más de 250 estudios que el efecto del espaciamiento es uno de los fenómenos más robustos y replicables de la psicología del aprendizaje, y sin embargo, su implementación sistemática en los planes de estudio sigue siendo excepcional.

Las células gliales, tradicionalmente relegadas a funciones de soporte, participan de maneras cada vez más reconocidas en la modulación sináptica. Los astrocitos, en particular, regulan la concentración de neurotransmisores en el espacio extracelular, suministran sustratos metabólicos a las neuronas activas y participan en la denominada "sinapsis tripartita", un concepto acuñado por Araque et al. (1999) que amplía la noción clásica de comunicación sináptica para incluir la participación glial. Los astrocitos liberan gliotransmisores D-serina, ATP, glutamato que modulan la excitabilidad neuronal y la plasticidad sináptica; la D-serina, de hecho, actúa como co-agonista del receptor NMDA, lo que significa que la LTP misma depende parcialmente de la actividad astrocítica (Henneberger et al., 2010). Investigaciones recientes de Santello et al. (2023) sugieren que los astrocitos desempeñan un papel mediador en la consolidación de la memoria dependiente de sueño, un dato que enlaza directamente con las consideraciones sobre higiene del sueño que se abordarán en el Capítulo 6.

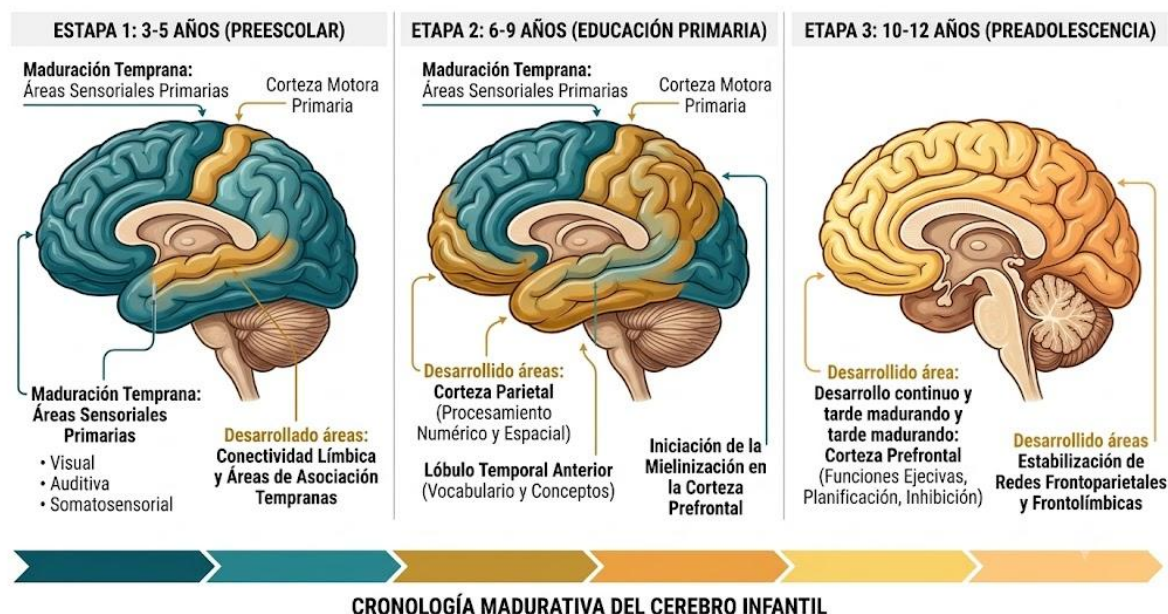
La microglía, el otro tipo principal de célula glial, ha emergido como un actor inesperado en la neurobiología del desarrollo. Estas células, de origen inmunológico, no solo defienden al cerebro de patógenos sino que participan activamente en la poda sináptica, fagocitando sinapsis que no han sido suficientemente reforzadas por la experiencia. Paolicelli et al. (2011) demostraron que ratones con deficiencia en el receptor CX3CR1 de la microglía presentan un exceso de sinapsis y déficits en la conectividad funcional, lo que sugiere que la poda mediada por microglía es indispensable para la configuración normal de los circuitos cerebrales durante el desarrollo. La relevancia de este hallazgo se amplía cuando se considera que factores ambientales como la inflamación sistémica, la mala nutrición o el estrés crónico pueden alterar la función microglial, con consecuencias potenciales sobre la poda sináptica y, por extensión, sobre el desarrollo cognitivo del niño, un tema que la neuroeducación apenas ha comenzado a explorar con la seriedad que merece.

### **1.3. Desarrollo ontogenético del cerebro infantil: cronología madurativa de las estructuras corticales y subcorticales entre los 3 y los 12 años**

El desarrollo cerebral no es un proceso lineal ni homogéneo. Distintas regiones del cerebro maduran a ritmos diferentes siguiendo un gradiente que, como regla general, progresa desde las áreas sensoriales primarias hacia las áreas de asociación y, dentro de estas, desde las regiones parietales y temporales hacia las frontales. Según, Gogtay et al. (2004) documentaron esta secuencia madurativa mediante resonancia magnética estructural longitudinal en niños y adolescentes, y sus hallazgos han sido confirmados y refinados por estudios posteriores con muestras más amplias y técnicas más sensibles, como los del consorcio ABCD (Adolescent Brain Cognitive Development), que sigue a más de once mil niños estadounidenses desde los nueve años con evaluaciones periódicas de neuroimagen, cognición, genética y ambiente (Casey et al., 2018; Marek et al., 2022). En la figura 3 se muestra toda la secuencia de la maduración cortical.

**Figura 3**

*Secuencia madurativa cortical entre los 3 y los 12 años*



Antes de abordar la cronología madurativa del período que nos ocupa, conviene recordar brevemente los hitos prenatales y perinatales que configuran el punto de partida. La neurogénesis cortical se completa esencialmente antes del nacimiento: la inmensa mayoría de las neuronas que un ser humano tendrá en su vida se generan entre las semanas 5 y 25 de gestación en la zona ventricular y subventricular del tubo neural, desde donde migran siguiendo gradientes moleculares hasta ocupar su posición definitiva en las capas corticales (Rakic, 2009). Las excepciones a esta regla la neurogénesis postnatal en el giro dentado del hipocampo y en la zona subventricular adyacente a los ventrículos laterales han sido objeto de intensa investigación y debate. Moreno-Jiménez et al. (2019) publicaron evidencia de neurogénesis hipocámpal persistente en humanos adultos, un hallazgo que otros laboratorios han cuestionado pero que, de confirmarse en la población infantil con la magnitud sugerida, tendría implicaciones directas para la comprensión de la formación de memorias declarativas durante la edad escolar.

Entre los tres y los cinco años, el cerebro del niño experimenta una exuberancia sináptica que alcanza densidades superiores a las del cerebro adulto en múltiples regiones corticales. Las áreas sensoriales primarias visual, auditiva, somatosensorial han completado ya la mayor parte de su organización columnar básica, pero las áreas de asociación, especialmente la corteza prefrontal, apenas inician un proceso de diferenciación que se extenderá hasta bien

entrada la tercera década de vida. El volumen total del cerebro alcanza aproximadamente el 90% del volumen adulto hacia los seis años, lo cual puede inducir la falsa impresión de que el cerebro del niño que entra a primer grado está "casi completo". La proporción de sustancia gris versus sustancia blanca, la densidad sináptica regional, la eficiencia de los tractos de fibra larga y los patrones de activación funcional difieren sustancialmente de los del adulto (Lebel y Deoni, 2018). El cerebro de un niño de seis años se parece al de un adulto en tamaño como una casa a medio construir se parece a una casa terminada en superficie: las dimensiones son similares, pero la estructura interna, las conexiones entre habitaciones y los acabados funcionales están lejos de completarse.

El período entre los tres y los cinco años es también el de una eclosión lingüística que tiene correlatos neuroanatómicos documentados. El fascículo arqueado, el tracto de sustancia blanca que conecta las áreas de Broca y Wernicke y que soporta la repetición de habla y la integración fonológico-semántica, muestra un incremento significativo en su integridad microestructural durante estos años (Skeide et al., 2016). La maduración de este tracto correlaciona con la complejidad sintáctica del habla espontánea del niño, lo que sugiere que el desarrollo del lenguaje no depende únicamente de la exposición ambiental al input lingüístico que el niño recibe sino también de que la infraestructura de sustancia blanca haya alcanzado un nivel de maduración suficiente para soportar las demandas computacionales del procesamiento sintáctico. Esta observación tiene implicaciones pedagógicas concretas para la educación preescolar: un programa que fuerce la enseñanza de estructuras sintácticas complejas antes de que el fascículo arqueado haya alcanzado un nivel madurativo suficiente puede generar frustración sin ganancia, mientras que un programa que proporcione un input lingüístico rico y diverso pero respetuoso con los ritmos madurativos puede facilitar, en lugar de forzar, la adquisición.

Entre los seis y los nueve años se producen transformaciones especialmente relevantes para la educación básica. La corteza parietal, involucrada en el procesamiento numérico y espacial, muestra un refinamiento microestructural que coincide con la capacidad del niño para operar con cantidades abstractas y comprender la línea numérica mental; la región del surco intraparietal, que Dehaene (2011) identificó como el correlato neural del sentido numérico, incrementa su conectividad funcional con las regiones prefrontales durante estos años, permitiendo un control progresivamente más voluntario de la aritmética. La transición del conteo con los dedos al cálculo mental, que típicamente ocurre entre los siete y los nueve años, no es un simple cambio de estrategia didáctica: refleja un desplazamiento de la actividad cerebral desde las cortezas motoras y somatosensoriales hacia el surco intraparietal y la corteza

prefrontal, una reorganización que Rivera et al. (2005) documentaron con resonancia magnética funcional y que depende tanto de la instrucción como de la maduración.

Simultáneamente, las áreas perisilvianas del hemisferio izquierdo consolidan la arquitectura que soporta la lectura fluida: la región occipitotemporal ventral izquierda, denominada "área de la forma visual de la palabra" por Cohen et al. (2002), se especializa progresivamente para el reconocimiento rápido de las formas ortográficas, un proceso que depende críticamente de la instrucción lectora y no ocurre de forma espontánea (Dehaene et al., 2015). Yeatman et al. (2012) demostraron mediante tractografía longitudinal que la integridad del fascículo longitudinal inferior izquierdo el tracto que conecta la corteza visual con la región temporal ventral predice la velocidad de lectura un año después, un hallazgo que subraya el papel de la maduración de la sustancia blanca como condición habilitante para los aprendizajes académicos formales. La implicación pedagógica directa es que la variabilidad en el ritmo de adquisición lectora entre niños de primer grado no refleja necesariamente diferencias en inteligencia o motivación, sino diferencias en el tempo madurativo de los tractos de sustancia blanca que soportan los circuitos de lectura, una distinción que debería informar las decisiones sobre cuándo y cómo diagnosticar dificultades lectoras tempranas.

Los años entre los nueve y los doce marcan el inicio de cambios puberales que repercuten en la organización cerebral de formas que la escuela no siempre anticipa. Los incrementos en la producción de hormonas gonadales modifican la sensibilidad de los receptores dopaminérgicos y serotoninérgicos en el sistema límbico, lo que puede traducirse en una mayor reactividad emocional y una búsqueda intensificada de recompensa social, como han documentado Ladouceur et al. (2022) mediante tareas de recompensa social en resonancia magnética funcional con preadolescentes. La corteza prefrontal, que debería ejercer una regulación descendente sobre estas respuestas, continúa madurando a un ritmo más lento, generando un desbalance temporal entre la reactividad límbica y la capacidad regulatoria cortical. Ese desbalance, que Somerville et al. (2010) describieron como un modelo de "doble sistema", tiene implicaciones directas para la gestión del aula en los últimos grados de primaria: el docente trabaja con cerebros donde la intensidad emocional supera transitoriamente la capacidad de autorregulación. Blakemore (2018) ha extendido este modelo argumentando que la hipersensibilidad social del preadolescente no es un defecto madurativo sino una adaptación funcional que facilita el aprendizaje social en un período en que el individuo comienza a expandir su mundo relacional más allá del núcleo familiar, una perspectiva que debería modificar la manera en que los docentes interpretan conductas que frecuentemente etiquetan como "rebeldía" o "distracción".

Las estructuras subcorticales siguen trayectorias madurativas propias que no siempre coinciden con las corticales. El cuerpo estriado, componente clave del sistema de recompensa, muestra cambios volumétricos y en la densidad de receptores dopaminérgicos D2 que se intensifican durante la preadolescencia (Galván, 2021). El hipocampo, cuya función en la formación de memorias declarativas lo convierte en una estructura de interés primario para la educación, experimenta un proceso de maduración prolongado que incluye cambios en la proporción entre sus subregiones CA1, CA3 y giro dentado y en la eficiencia de los circuitos trisinápticos que soportan la codificación y la recuperación de recuerdos. Gómez y Edgin (2016) propusieron que la maduración diferencial de las subregiones hipocámpales explica cambios cualitativos en las capacidades mnésicas de los niños: la capacidad para formar memorias episódicas ricas, detalladas y contextualmente específicas depende de circuitos hipocámpales cuya maduración completa no se alcanza hasta aproximadamente los ocho años, lo que ofrece una explicación neurobiológica al fenómeno de la amnesia infantil y a la dificultad de los niños más pequeños para recordar detalles contextuales de los eventos de aprendizaje.

El cerebelo, que durante mucho tiempo se asoció exclusivamente con la coordinación motora, ha sido implicado en funciones cognitivas que incluyen la memoria de trabajo, la planificación temporal, el procesamiento lingüístico y el aprendizaje procedimental. Estudios de conectividad funcional han revelado circuitos cerebeloso-corticales cuyo desarrollo durante la infancia media correlaciona con el rendimiento en tareas de lectura y matemáticas (Stoodley y Schmahmann, 2022). Lesiones cerebelosas adquiridas en la infancia pueden producir el síndrome cerebeloso cognitivo-afectivo, que incluye dificultades en funciones ejecutivas, procesamiento lingüístico y regulación emocional, un cuadro que demuestra que la contribución del cerebelo al aprendizaje escolar es más sustancial de lo que los modelos clásicos reconocían.

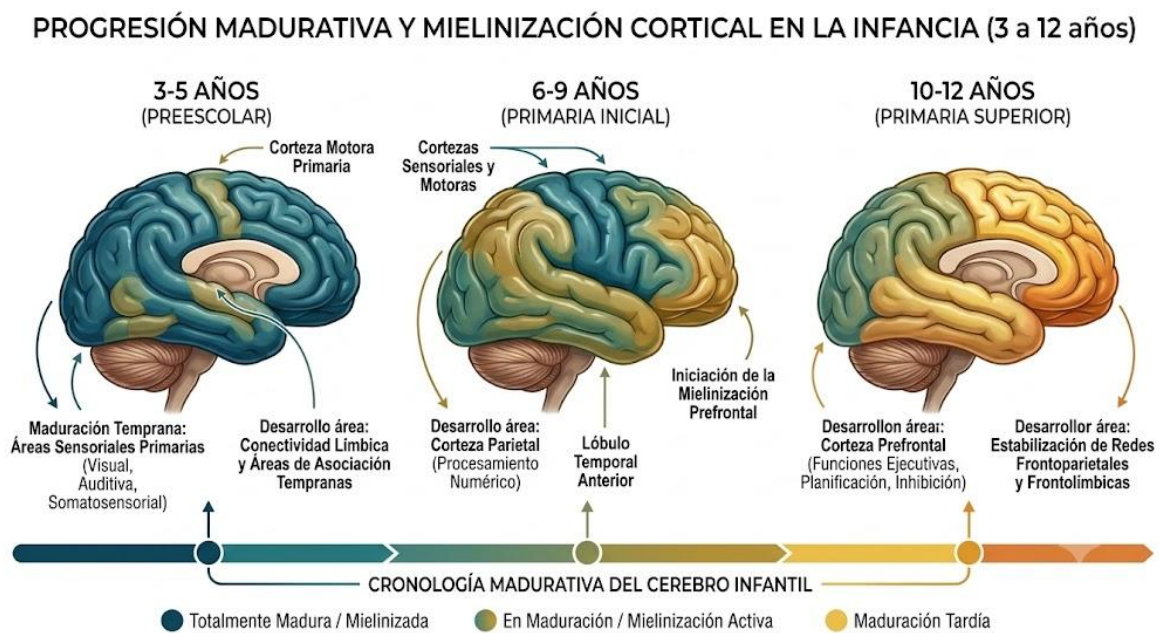
#### **1.4. Mielinización, poda sináptica y conectividad funcional: los tres procesos que esculpen el cerebro del estudiante de educación básica**

La metáfora del escultor, aunque imperfecta, captura una dimensión del desarrollo cerebral que la metáfora más habitual del crecimiento no logra transmitir: el cerebro infantil no se hace más complejo por adición continua, sino por una combinación de adición selectiva y eliminación masiva. La poda sináptica, la mielinización y la reorganización de la conectividad funcional constituyen los tres procesos que, operando de forma concurrente, pero con

cronologías regionales distintas, transforman un cerebro con exceso de conexiones inespecíficas en un cerebro con circuitos más eficientes y especializados. En la figura 4 se muestra la representación neural de la lectura y el sentido numérico.

**Figura 4**

*Representación neural de la lectura y el sentido numérico*



La poda sináptica consiste en la eliminación de sinapsis que no han sido suficientemente reforzadas por la experiencia. En la corteza visual primaria, la densidad sináptica alcanza su pico máximo hacia los ocho meses de vida y desciende luego hasta niveles adultos aproximadamente a los seis años; en la corteza prefrontal dorsolateral, el pico se alcanza mucho más tarde hacia los tres o cuatro años, según algunas estimaciones y la poda se extiende hasta la adolescencia tardía o incluso la tercera década (Petanjek et al., 2011). Este desfase cronológico entre regiones tiene una consecuencia pedagógica directa: la ventana temporal durante la cual la experiencia escolar puede influir en la configuración sináptica de la corteza prefrontal es mucho más amplia de lo que suele asumirse, lo cual otorga a la educación básica un papel de mayor trascendencia neurobiológica del que comúnmente se le reconoce. Los docentes de primer grado no solo enseñan a leer y sumar: están participando en la configuración de los circuitos prefrontales que soportarán las funciones ejecutivas durante el resto de la vida del alumno.

La poda opera bajo un principio que se ha resumido con la frase atribuida a Hebb: "las neuronas que disparan juntas, se conectan juntas; las neuronas que no disparan juntas, pierden".

su conexión". Aunque esta formulación es una simplificación la poda depende también de señales moleculares como el complemento C1q y la microglía fagocítica, como han documentado Schafer et al. (2012), su núcleo conceptual tiene un poder explicativo considerable. Cada hora que un niño pasa en el aula, su cerebro está recibiendo señales que determinan qué sinapsis se consolidarán y cuáles se eliminarán. La calidad de la experiencia educativa, por tanto, no solo aporta conocimiento: configura, literalmente, la microestructura del cerebro. Sellgren et al. (2023) han propuesto que una poda sináptica excesiva o deficiente podría estar implicada en trastornos del neurodesarrollo, un tema que se abordará con mayor detalle en el Capítulo 7.

La dimensión temporal de la poda merece un análisis más detallado. Huttenlocher (1979), en su trabajo pionero con tejido cerebral posmortem, estableció las curvas de densidad sináptica por región que siguen siendo referencia. Sus datos mostraron que la corteza auditiva alcanza su máxima densidad sináptica hacia los tres meses de vida, la corteza visual hacia los ocho meses, y la corteza prefrontal entre los 12 y los 24 meses. La poda posterior reduce esa densidad hasta niveles adultos, pero lo hace a ritmos drásticamente diferentes: mientras la corteza visual alcanza su densidad adulta antes de los 10 años, la corteza prefrontal no lo hace hasta pasados los 15. Bourgeois et al. (1994) confirmaron estas trayectorias en primates no humanos y sugirieron que la prolongación de la poda prefrontal podría ser una característica específicamente humana, vinculada a la excepcional extensión del período de dependencia juvenil en nuestra especie. Desde la perspectiva educativa, este dato implica que la educación básica transcurre durante un período en el que la corteza prefrontal está siendo activamente esculpida por la experiencia, lo que confiere a cada interacción pedagógica un peso neurobiológico que se reduce progresivamente a medida que la poda avanza y las sinapsis restantes se consolidan.

La mielinización consiste en el recubrimiento progresivo de los axones por vainas de mielina, una sustancia lipoproteica producida por los oligodendrocitos en el sistema nervioso central. La mielina incrementa la velocidad de conducción del impulso nervioso de manera drástica de 0,5-2 metros por segundo en axones amielínicos a 70-120 metros por segundo en fibras gruesas mielinizadas y reduce la dispersión del impulso, lo que permite una sincronización temporal más precisa entre regiones cerebrales distantes. Fields (2015) propuso que la mielinización no es un simple programa madurativo genéticamente predeterminado, sino un proceso sensible a la actividad: los oligodendrocitos responden a la actividad eléctrica de los axones que recubren, de modo que la experiencia repetida de un circuito promueve su mielinización. McKenzie et al. (2022) confirmaron esta hipótesis en modelos animales y

sugirieron que un mecanismo análogo opera en el cerebro humano infantil, lo que confiere a la práctica educativa repetida leer todos los días, resolver problemas aritméticos con regularidad un efecto no solo sobre la memoria, sino sobre la infraestructura biofísica que permite a la información viajar eficientemente entre nodos de una red neural.

La cronología de la mielinización sigue un patrón predecible que replica, grosso modo, la secuencia madurativa cortical: las vías sensoriales se mielinizan primero, seguidas por las vías motoras, y las vías asociativas de largo alcance se mielinizan más tardíamente. El cuerpo calloso muestra un gradiente anteroposterior en su mielinización: las fibras que conectan regiones occipitales se mielinizan antes que las que conectan regiones frontales, un patrón que Lebel et al. (2008) documentaron mediante imagen por tensor de difusión en una muestra longitudinal de niños de 5 a 19 años. Las fibras del esplenio (porción posterior del cuerpo calloso), que conectan las cortezas visuales de ambos hemisferios, alcanzan niveles de mielinización cercanos al adulto hacia los 8 años, mientras que las del genu (porción anterior), que conectan las cortezas prefrontales, continúan mielinizándose hasta bien entrada la segunda década. La consecuencia funcional es que la coordinación interhemisférica para tareas que dependen de la corteza prefrontal como la alternancia de tareas, la inhibición de respuestas habituales o la resolución de conflictos cognitivos madura más lentamente que la coordinación interhemisférica para tareas perceptivas.

La conectividad funcional, medida habitualmente como la correlación temporal de la actividad espontánea entre regiones cerebrales durante el estado de reposo, sufre una reorganización profunda durante la infancia. Las redes de gran escala identificadas en adultos la red de modo predeterminado, la red frontoparietal, la red de saliencia, las redes sensoriales existen ya en forma incipiente en el cerebro infantil, pero su topología difiere. Los datos del estudio longitudinal de Marek et al. (2022) muestran que la segregación entre la red de modo predeterminado y la red de control ejecutivo, que en adultos es pronunciada y considerada un marcador de madurez cognitiva, aumenta de forma gradual entre los 9 y los 14 años. La falta de segregación en niños más pequeños podría explicar, al menos en parte, por qué les resulta difícil suprimir pensamientos irrelevantes durante tareas que exigen atención sostenida: las redes que deberían desactivarse durante la concentración mantienen una actividad residual que interfiere con el rendimiento. Fair et al. (2009) fueron de los primeros en documentar este fenómeno, mostrando que la transición de una conectividad predominantemente local a una conectividad predominantemente distribuida constituye uno de los rasgos más característicos del desarrollo cerebral entre los 7 y los 31 años.

Suárez et al. (2024) publicaron recientemente un metaanálisis de estudios de conectividad funcional en la infancia que reveló un patrón consistente: la integración entre regiones distantes aumenta con la edad mientras que la conectividad local tiende a disminuir, un fenómeno descrito como un desplazamiento de una arquitectura "local" a una "distribuida". Este patrón tiene correspondencias conductuales claras: los niños más pequeños dependen más de procesamiento perceptivos inmediatos y locales, mientras que los mayores son capaces de integrar información de múltiples fuentes de manera flexible y abstracta, precisamente la demanda que la escuela intensifica grado tras grado.

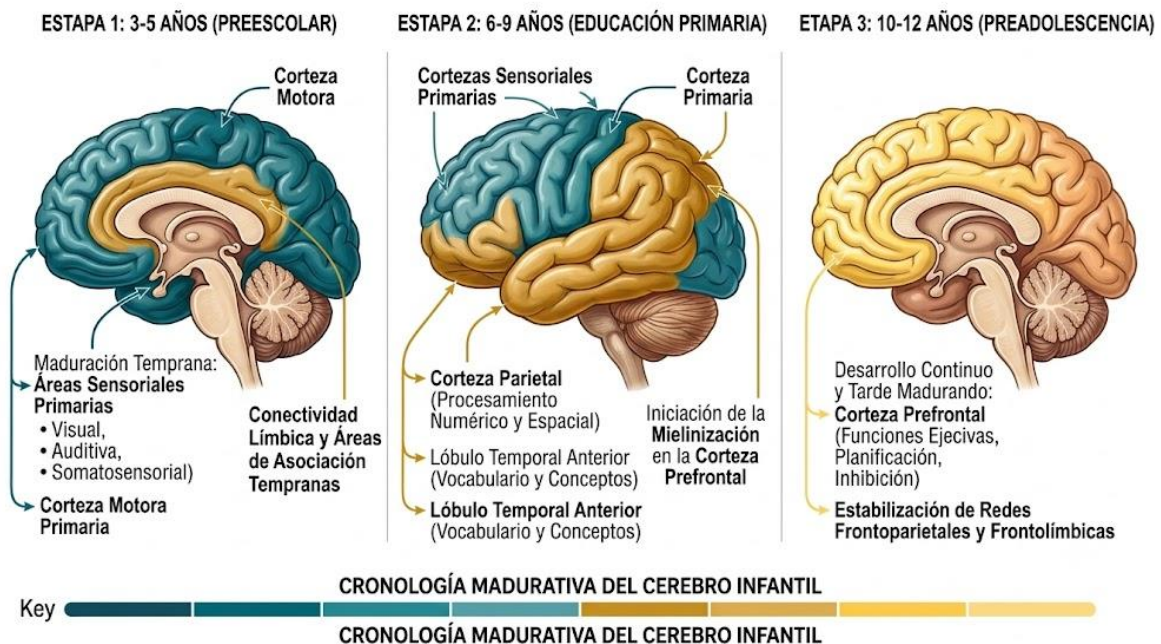
La interacción entre la poda sináptica, la mielinización y la reorganización de la conectividad funcional no es un proceso de tres vías independientes que convergen casualmente, sino un sistema integrado donde cada proceso influye sobre los otros. La mielinización de un tracto de fibra aumenta la sincronización temporal entre las regiones que conecta, lo que a su vez fortalece las sinapsis que median esa conexión (porque la sincronización es requisito para la LTP hebbiana), lo que a su vez protege esas sinapsis de la poda. Por la misma lógica, las sinapsis que no reciben mielinización suficiente pierden sincronización, se debilitan y se convierten en candidatas para la eliminación. Whitaker et al. (2016) propusieron un modelo en el que la maduración cortical opera como un ciclo de retroalimentación positiva entre la mielinización intracortical, la poda de sinapsis redundantes y el incremento en la eficiencia de procesamiento, un ciclo que la experiencia educativa puede acelerar o enlener según la calidad, la cantidad y la distribución temporal de los estímulos que proporciona.

### **1.5. Neurotransmisores implicados en el aprendizaje escolar: dopamina, serotonina, noradrenalina y acetilcolina en el contexto del aula**

Si la sinapsis es la unidad estructural del aprendizaje, el neurotransmisor es su mensajero químico. Reducir los neurotransmisores a sustancias individuales con funciones únicas constituye una distorsión que, lamentablemente, ha calado en la literatura divulgativa neuroeducativa: la dopamina "del placer", la serotonina "de la felicidad", la noradrenalina "del estrés". La realidad bioquímica es considerablemente más matizada, pero ciertos principios generales pueden formularse sin incurrir en simplificaciones groseras, y esos principios tienen relevancia para lo que ocurre en un aula.

**Figura 5**

*Evolución de la conectividad funcional (Local a Distribuida)*



La dopamina es un neurotransmisor catecolaminérgico sintetizado principalmente en los núcleos del mesencéfalo el área tegmental ventral y la sustancia negra desde donde se proyecta hacia la corteza prefrontal (vía mesocortical), el estriado ventral y el núcleo accumbens (vía mesolímbica), y los ganglios basales (vía nigroestriatal). La función de la dopamina no es producir placer, como señalan Berridge y Robinson (2016), sino señalar la expectativa de recompensa y, más precisamente, el error de predicción de recompensa: la diferencia entre lo esperado y lo obtenido. Cuando un niño resuelve un problema y obtiene un resultado inesperadamente positivo un elogio del docente, un punto extra, la satisfacción de comprender algo que antes le resultaba opaco, las neuronas dopaminérgicas emiten una señal fásica que fortalece las conexiones sinápticas activas en los circuitos que participaron en la resolución, aumentando la probabilidad de que la conducta se repita. Schultz (2016) describió con precisión esta señal como un mecanismo de aprendizaje por refuerzo que el cerebro implementa de manera automática: no requiere que el niño sea consciente del proceso, ni siquiera que el docente se lo proponga, pero responde a las contingencias ambientales que la estructura de la actividad pedagógica establece.

Howard-Jones et al. (2021) demostraron que la incorporación de elementos de incertidumbre controlada en actividades de aprendizaje por ejemplo, juegos donde la retroalimentación positiva es parcialmente impredecible genera mayor activación del circuito

mesolímbico dopaminérgico en niños de 8 a 11 años y, consecuentemente, mayor retención del material aprendido. Este hallazgo conecta con la teoría de la curiosidad como impulso epistémico propuesta por Gruber et al. (2014), quienes mostraron que los estados de curiosidad activan el circuito mesolímbico y facilitan no solo el aprendizaje del contenido que despertó la curiosidad, sino también el aprendizaje incidental de material presentado durante el estado curioso, un efecto de "desbordamiento" (spillover) que tiene aplicaciones directas en el diseño de secuencias didácticas: abrir una lección con una pregunta genuinamente intrigante podría mejorar la retención de todo el material posterior, no solo de la respuesta a esa pregunta.

La relevancia pedagógica de la dopamina se extiende más allá del sistema de recompensa. La vía mesocortical dopaminérgica modula las funciones ejecutivas en la corteza prefrontal, donde la dopamina actúa sobre receptores D1 siguiendo una relación de U invertida: niveles óptimos facilitan la memoria de trabajo y la flexibilidad cognitiva, mientras que niveles demasiado bajos o demasiado altos la deterioran (Arnsten, 2022). Un niño que experimenta aburrimiento extremo (baja activación dopaminérgica prefrontal) y un niño que experimenta ansiedad intensa (exceso de catecolaminas, incluida la dopamina, en la corteza prefrontal) pueden mostrar el mismo síntoma conductual desatención por mecanismos neuroquímicos opuestos, un dato que debería moderar las interpretaciones simplistas del comportamiento en el aula. El docente que observa a un niño desatento enfrenta, sin saberlo, un problema de diagnóstico diferencial neuroquímico: la intervención apropiada para el aburrimiento (aumentar la estimulación, introducir novedad) es exactamente la opuesta a la intervención apropiada para la ansiedad (reducir la presión, ofrecer seguridad), y aplicar una cuando se requiere la otra puede exacerbar el problema.

La dopamina tiene también un papel en la consolidación de memorias a largo plazo que trasciende su función más conocida en la señalización de recompensa. Las proyecciones dopaminérgicas desde el área tegmental ventral hacia el hipocampo modulan la LTP hipocámpal: Lisman y Grace (2005) propusieron un modelo de "circuito hipocampo-VTA" en el que la novedad detectada por el hipocampo activa el área tegmental ventral, la cual libera dopamina de vuelta en el hipocampo, facilitando la consolidación de la experiencia novedosa. Shohamy y Adcock (2010) confirmaron este modelo en humanos y demostraron que la anticipación de recompensa activa el mismo circuito, mejorando la memoria para eventos asociados a la anticipación incluso si la recompensa finalmente no se obtiene. La predicción educativa que se deriva es que la anticipación de algo positivo no necesariamente una recompensa material, sino una experiencia gratificante, un descubrimiento, una revelación conceptual puede ser más eficaz para la consolidación mnésica que la recompensa misma.

La noradrenalina, sintetizada en el locus coeruleus del tronco encefálico, proyecta de forma difusa a toda la corteza y opera como un modulador del estado de alerta y la detección de estímulos relevantes. Sara y Bouret (2012) describieron el sistema noradrenérgico como un mecanismo de "reinicio atencional" que permite al cerebro reorientar sus recursos hacia estímulos novedosos o significativos. La modulación noradrenérgica sigue también una curva de U invertida: la alerta moderada favorece la atención selectiva, pero el arousal excesivo como el que genera una situación de amenaza social en el aula: ser ridiculizado frente a los pares, por ejemplo compromete la función prefrontal y desplaza el control conductual hacia respuestas subcorticales más primitivas y menos flexibles. Los trabajos de Vogel y Schwabe (2023) con niños de 6 a 10 años mostraron que el estrés social agudo en el aula produce elevaciones de noradrenalina que, medidas indirectamente a través de la conductancia cutánea y la alfa-amilasa salival, correlacionan negativamente con el rendimiento en tareas de memoria de trabajo verbal. Arnsten (2009) había documentado previamente que concentraciones elevadas de noradrenalina activan receptores alfa-1 en la corteza prefrontal que, paradójicamente, debilitan la conectividad funcional de las redes prefrontales, produciendo una "desconexión funcional" de la corteza prefrontal del resto del cerebro. La traducción para el aula es directa y contundente: un niño que ha sido avergonzado públicamente puede experimentar una desactivación funcional transitoria de su corteza prefrontal, lo que significa que, durante los minutos siguientes al evento estresante, su capacidad para aprender cualquier contenido académico está biológicamente comprometida.

El locus coeruleus opera en dos modos funcionales que Aston-Jones y Cohen (2005) denominaron "tónico" y "fásico". En el modo tónico, el locus coeruleus mantiene una actividad basal moderada que sostiene un estado de alerta generalizada, adecuado para la exploración y la detección de estímulos novedosos en el ambiente. En el modo fásico, el locus coeruleus emite ráfagas breves de noradrenalina sincronizadas con la detección de un estímulo relevante, lo que amplifica la respuesta cortical a ese estímulo y suprime la respuesta a estímulos distractores. La transición del modo tónico al fásico facilita la atención focalizada, y la transición del fásico al tónico facilita la búsqueda exploratoria. Un docente que introduce una actividad nueva tras un período de instrucción directa está, funcionalmente, promoviendo una transición del modo fásico al tónico que permite a los alumnos "resetear" su sistema atencional y prepararse para una nueva ronda de exploración. La alternancia entre actividades que demandan foco sostenido y actividades que permiten exploración libre no es, por tanto, un capricho didáctico sino una práctica compatible con la fisiología del sistema noradrenérgico.

La serotonina, sintetizada en los núcleos del rafe, desempeña funciones moduladoras sobre el estado anímico, la impulsividad y la regulación emocional. Su papel en el contexto escolar ha sido menos estudiado de forma directa que el de la dopamina, pero la evidencia indirecta es considerable: los polimorfismos genéticos del transportador de serotonina (5-HTTLPR) modulan la susceptibilidad al estrés y la reactividad ante el fracaso académico, como documentaron Caspi et al. (2003) en un estudio que, aunque originalmente centrado en la depresión, abrió la puerta a investigaciones sobre la interacción gen-ambiente en el contexto educativo. Más recientemente, Frodl et al. (2022) encontraron que variantes en genes serotoninérgicos moderan el efecto del apoyo docente percibido sobre la regulación emocional en niños de 8 a 12 años, sugiriendo que la relación pedagógica tiene un impacto diferencial según la dotación neurobiológica del alumno, no como determinismo genético sino como sensibilidad diferencial al ambiente. El modelo de la "susceptibilidad diferencial" (differential susceptibility) propuesto por Belsky y Pluess (2009) postula que los mismos polimorfismos genéticos que hacen a un niño más vulnerable ante ambientes adversos lo hacen también más receptivo ante ambientes enriquecidos; la serotonina participa en esta modulación de forma prominente. Para el docente, este modelo implica que los alumnos que parecen más "sensibles" o "difíciles" podrían ser, paradójicamente, los que más se benefician de una relación pedagógica cálida y de un ambiente de aula seguro, porque su neurobiología los hace más permeables tanto a lo negativo como a lo positivo.

La serotonina influye también en procesos cognitivos con relevancia escolar directa. La impulsividad, que en el aula se manifiesta como la tendencia a responder antes de pensar, a interrumpir a otros y a abandonar tareas que requieren espera, tiene un componente serotoninérgico bien documentado. Cools et al. (2008) mostraron que la depleción experimental de serotonina incrementa las conductas impulsivas en tareas de toma de decisiones, y Walderhaug et al. (2007) replicaron este efecto en adolescentes. La regulación serotoninérgica de la impulsividad opera a través de proyecciones desde los núcleos del rafe hacia la corteza orbitofrontal y la corteza cingulada anterior, dos regiones que maduran tardíamente y cuya funcionalidad depende, en parte, de un tono serotoninérgico adecuado. Las intervenciones que promueven la regulación emocional en el aula técnicas de respiración, momentos de pausa reflexiva, estrategias de resolución de conflictos podrían actuar, entre otros mecanismos, modulando el tono serotoninérgico a través de la activación de circuitos prefrontales que ejercen una influencia descendente sobre los núcleos del rafe.

La acetilcolina, producida en el prosencéfalo basal (núcleos de Meynert) y en los núcleos pedunculopontinos, es el neurotransmisor canónico de la atención selectiva y la

plasticidad cortical dependiente de la experiencia. Estudios clásicos de Bakin y Weinberger (1996) demostraron que la liberación de acetilcolina durante la exposición a un estímulo sensorial específico es condición necesaria para que la corteza auditiva modifique su mapa tonotópico en función de la experiencia, un hallazgo que fue interpretado como evidencia de que la atención mediada colinérgicamente funciona como un "portero" de la plasticidad. La metáfora del portero es particularmente fértil para la educación: sin atención, la plasticidad sináptica no se activa de la manera dirigida que el aprendizaje escolar requiere; la información que entra al cerebro de un niño desatento es procesada por las áreas sensoriales primarias pero no recibe la modulación colinérgica que permitiría su consolidación en los circuitos corticales de asociación.

Trabajos más recientes de Liu et al. (2022) han extendido estos hallazgos al contexto del aprendizaje lector, mostrando que la disponibilidad colinérgica, estimada mediante variantes genéticas del receptor nicotínico, predice la velocidad de adquisición de la correspondencia grafema-fonema en niños de primer grado. Hasselmo y Sarter (2011) propusieron un modelo según el cual la acetilcolina modula el equilibrio entre la influencia top-down (expectativas, conocimiento previo) y la influencia bottom-up (estimulación sensorial entrante) en el procesamiento cortical: niveles altos de acetilcolina favorecen la influencia bottom-up, lo que facilita el aprendizaje de material nuevo, mientras que niveles bajos favorecen la influencia top-down, lo que facilita la recuperación de memorias ya consolidadas. Si este modelo es correcto, las fluctuaciones naturales en el tono colinérgico a lo largo del día que muestran un pico en las primeras horas de la mañana y un descenso gradual hacia la tarde podrían hacer que la mañana sea un momento más favorable para la introducción de contenidos nuevos y la tarde un momento más adecuado para actividades de repaso y consolidación, una predicción que coincide con observaciones informales de muchos docentes pero que requiere mayor investigación sistemática en contextos escolares reales.

El sistema GABAérgico, principal sistema inhibitorio del cerebro, merece una mención que frecuentemente se omite en los textos de neuroeducación pese a su importancia capital. El ácido gamma-aminobutírico (GABA) actúa a través de receptores GABA-A y GABA-B mediando la inhibición sináptica rápida y lenta, respectivamente. Sin un tono GABAérgico adecuado, la actividad cortical se desorganizaría en descargas excitatorias incontroladas la epilepsia es, en su forma más elemental, un fracaso de la inhibición GABAérgica. Pero el papel del GABA en el aprendizaje va más allá de la prevención de la hiperexcitabilidad: la inhibición GABAérgica permite la selectividad de la respuesta cortical, el filtrado de estímulos irrelevantes y la estabilización de las representaciones en la memoria de trabajo. Yoon et al.

(2023) encontraron, mediante espectroscopía por resonancia magnética, que la concentración de GABA en la corteza prefrontal de niños de 8 a 12 años predice su rendimiento en tareas de control inhibitorio, un hallazgo que vincula directamente la neuroquímica inhibitoria con las funciones ejecutivas que la escuela demanda con insistencia creciente.

### **1.6. Del dato neurocientífico a la práctica pedagógica: puentes epistemológicos, riesgos de sobreinterpretación y el problema de los neuromitos**

La traducción del conocimiento neurocientífico al aula enfrenta una tensión que conviene abordar con franqueza. Por un lado, la comprensión de los mecanismos cerebrales del aprendizaje ofrece un marco explicativo que puede enriquecer la toma de decisiones didácticas y fundamentar intervenciones educativas sobre bases más sólidas que la tradición o la intuición. Por otro, la distancia entre el dato obtenido en un laboratorio de neuroimagen una señal BOLD medida con resolución milimétrica en un participante acostado dentro de un escáner, realizando una tarea que poco se parece a una lección escolar y la decisión pedagógica concreta qué hacer el lunes a las ocho de la mañana con treinta niños de distintos contextos socioeconómicos es enorme, y atravesarla sin cautela epistemológica puede generar más confusión que claridad.

Los estudios Bruer (1997) fue uno de los primeros en señalar este problema con su metáfora del "puente demasiado lejano", argumentando que la neurociencia y la educación necesitaban una disciplina intermediaria la psicología cognitiva para traducir hallazgos de un nivel de análisis al otro. Más de dos décadas después, su advertencia sigue siendo pertinente, aunque el campo ha evolucionado. Howard-Jones (2014) argumentó que la metáfora de Bruer necesitaba actualizarse porque la neurociencia cognitiva del desarrollo había avanzado hasta un punto en que algunos hallazgos podían informar la práctica educativa de manera más directa, siempre que se respetaran ciertos criterios de evidencia. Tokuhamma-Espinosa (2019) ha propuesto un modelo de translación que distingue entre principios neurocientíficos bien establecidos, tenencias (hallazgos con evidencia creciente pero aún no consolidados) e información neurocientífica preliminar que no debería trasladarse directamente al aula sin mayor investigación. Thomas et al. (2022) han ampliado este modelo proponiendo criterios operativos para evaluar cuándo un hallazgo neurocientífico ha alcanzado un nivel de madurez suficiente como para informar la práctica educativa: convergencia de evidencia proveniente de al menos tres métodos distintos (neuroimagen, electrofisiología, estudios comportamentales), replicación en muestras ecológicamente válidas, y existencia de mecanismos plausibles que conecten el nivel neural con el nivel conductual.

La cuestión de los niveles de análisis es más compleja de lo que suele reconocerse en la literatura de divulgación. Marr (1982), en su influyente marco teórico sobre la visión, distinguió tres niveles de análisis de los sistemas de procesamiento informativo: el nivel computacional (qué problema resuelve el sistema y por qué), el nivel algorítmico (qué representaciones y procesos utiliza para resolverlo) y el nivel implementacional (en qué sustrato físico se implementan esos procesos). La neurociencia opera predominantemente en el nivel implementacional, la psicología cognitiva en el algorítmico, y la pedagogía en un nivel que podría describirse como pragmático o ecológico. La tentación de saltar del nivel implementacional al pragmático sin pasar por el algorítmico es la fuente de muchos malentendidos. Saber que la lectura activa el giro fusiforme izquierdo (nivel implementacional) no prescribe directamente cómo enseñar a leer (nivel pragmático), pero saber que el reconocimiento de palabras requiere una decodificación fonológica previa que automatice la correspondencia grafema-fonema (nivel algorítmico) sí tiene consecuencias didácticas claras. La neurociencia aporta valor educativo cuando sus hallazgos convergen con y refuerzan principios del nivel algorítmico; pierde ese valor cuando se la invoca para decorar con autoridad científica prescripciones pedagógicas que carecen de un mecanismo mediador identificable.

Los neuromitos creencias falsas sobre el cerebro que se presentan como conocimiento neurocientífico y se utilizan para justificar prácticas educativas constituyen el riesgo más visible de una translación mal hecha. Dekker et al. (2012) documentaron por primera vez la prevalencia de neuromitos entre docentes del Reino Unido y los Países Bajos, encontrando que mitos como "usamos solo el 10% del cerebro", "los estilos de aprendizaje basados en VAK (visual, auditivo, kinestésico) tienen fundamento neurocientífico" o "hay personas predominantemente de cerebro izquierdo y personas predominantemente de cerebro derecho" eran creídos por más del 80% de los docentes encuestados. Estudios posteriores han replicado estos hallazgos en muestras de docentes latinoamericanos con resultados igualmente preocupantes: Falquez y Ocampo (2022) encontraron tasas de adhesión a neuromitos superiores al 70% en una muestra de docentes ecuatorianos con formación de posgrado, y Gleichgerrcht et al. (2015) documentaron prevalencias similares en Argentina, Chile y Perú. Un dato particularmente inquietante de estos estudios es la correlación positiva entre el interés del docente por la neurociencia y la susceptibilidad a los neuromitos: los docentes más entusiastas con la neuroeducación son, paradójicamente, los más vulnerables a la desinformación, probablemente porque consumen material divulgativo de baja calidad sin las herramientas de pensamiento crítico necesarias para evaluarlo.

El mito de los estilos de aprendizaje merece atención particular porque su influencia en la práctica educativa es ubicua y su desmontaje requiere una argumentación matizada. La idea de que cada alumno tiene un estilo sensorial preferente (visual, auditivo o kinestésico) y que la enseñanza debe adaptarse a ese estilo para maximizar el aprendizaje carece de respaldo neurocientífico. Coffield et al. (2004) revisaron 71 modelos de estilos de aprendizaje y concluyeron que ninguno cumplía criterios mínimos de validez y fiabilidad. Pashler et al. (2008) establecieron un estándar experimental para evaluar la hipótesis de los estilos de aprendizaje demostrar una interacción cruzada entre el estilo del alumno y la modalidad de instrucción, de modo que los alumnos "visuales" aprendan mejor con instrucción visual y peor con instrucción auditiva, y viceversa y concluyeron que la evidencia disponible no satisfacía ese estándar. Newton y Miah (2017) documentaron que la creencia en los estilos de aprendizaje persiste entre docentes incluso después de ser expuestos a evidencia en contra, lo que sugiere que el mito cumple una función psicológica ofrecer una explicación sencilla y accionable para la diversidad en el aprendizaje que resiste a la corrección factual. Riener y Willingham (2010) propusieron que lo que la evidencia sí respalda es la idea de que los contenidos tienen modalidades óptimas de presentación (la geometría se beneficia de la presentación visual, la prosodia del lenguaje requiere la modalidad auditiva), pero esa adaptación debe hacerse al contenido, no al alumno. Distinguir entre "diferenciar la instrucción según el contenido" (práctica respaldada) y "diferenciar la instrucción según el estilo del alumno" (práctica sin respaldo) permite al docente abandonar el mito sin renunciar a la práctica deseable de presentar los contenidos en la modalidad más apropiada para su naturaleza.

Otro neuromito con arraigo persistente afirma que los primeros tres años de vida constituyen un período crítico tras el cual las oportunidades de aprendizaje se cierran irreversiblemente. Aunque existen períodos sensibles bien documentados para ciertas funciones la visión binocular, la discriminación fonémica de lenguas, la extrapolación de estos hallazgos específicos a una ventana general de aprendizaje que se cierra a los tres años es incorrecta y tiene consecuencias pedagógicas nocivas, como la desvalorización de la educación básica bajo el argumento de que "ya es tarde" (Howard-Jones, 2014). El cerebro mantiene una plasticidad significativa durante toda la vida, aunque su naturaleza cambia con la edad, como se abordará en el Capítulo 2. Bruer (1999) documentó cómo este mito se originó en una interpretación distorsionada de hallazgos sobre la sinaptogénesis y la poda sináptica: el hecho de que la densidad sináptica disminuya después de un pico temprano fue erróneamente interpretado como una "pérdida de potencial de aprendizaje", cuando en realidad la poda es un proceso optimizador que incrementa la eficiencia de los circuitos.

La lista de neuromitos se extiende más allá de los tres más conocidos. La creencia en que las diferencias de género en el rendimiento matemático se deben a diferencias en la estructura cerebral, la idea de que los ejercicios de coordinación cruzada (como el Brain Gym) mejoran la integración hemisférica y el aprendizaje, la noción de que el azúcar produce hiperactividad y la afirmación de que el cerebro es multitarea son ejemplos de creencias que la investigación ha descartado o matizado seriamente pero que continúan circulando en contextos educativos. Pasquinelli (2012) propuso que la vulnerabilidad de los docentes a los neuromitos se explica por la combinación de tres factores: la seducción de las explicaciones que invocan el cerebro (que suenan más "científicas" que las explicaciones psicológicas), la dificultad de acceder a la literatura primaria en neurociencia (publicada en inglés, en revistas especializadas, con lenguaje técnico) y la presión institucional por incorporar "innovación basada en evidencia" que crea una demanda que la divulgación de baja calidad se apresura a satisfacer.

La neuroeducación, entendida como la intersección disciplinar entre neurociencia, psicología cognitiva y pedagogía, requiere una postura epistemológica que combine la apertura al conocimiento neurocientífico con la resistencia a la aplicación prematura o distorsionada. Immordino-Yang (2016) ha insistido en que la contribución más valiosa de la neurociencia a la educación no consiste en prescribir técnicas específicas, sino en transformar la comprensión que los docentes tienen del aprendizaje: comprender que las emociones no son obstáculos para el pensamiento sino componentes constitutivos de la cognición, que la memoria no es un almacén pasivo sino un proceso constructivo, que la atención no es un rasgo fijo sino una habilidad entrenable, cambia las premisas sobre las cuales el docente diseña sus intervenciones, aun cuando esas intervenciones no invoquen explícitamente la neurociencia.

Esa transformación conceptual opera en lo que Tokuhamma-Espinosa (2019) denomina la "mentalidad neuroeducada" del docente: no un repertorio de técnicas con la etiqueta "neuro-" sino una comprensión profunda de los procesos biológicos que subyacen al aprendizaje, una comprensión que informa el juicio profesional sin sustituirlo. El docente con mentalidad neuroeducada no aplica una receta cuando un niño tiene dificultades; se pregunta qué podría estar ocurriendo en el nivel neurocognitivo problemas de memoria de trabajo, dificultad para inhibir distractores, falta de la base conceptual que el nuevo aprendizaje requiere, estrés emocional que compromete la función prefrontal, genera hipótesis y ajusta su intervención en función de la respuesta del alumno. Es esa flexibilidad reflexiva, más que la importación directa de técnicas de laboratorio, la que puede hacer de la neuroeducación una empresa intelectual fértil y éticamente responsable.

La ética de la neuroeducación presenta dilemas que apenas comienzan a articularse. Smeyers (2016) planteó la pregunta de si la neurociencia, al explicar el aprendizaje en términos de procesos cerebrales, reduce al alumno a su biología y erosiona la agencia personal. La pregunta no es trivial: un docente que explica la desatención de un niño diciendo "su corteza prefrontal aún no ha madurado" puede estar exculpando una conducta que requiere intervención pedagógica, o puede estar proporcionando un marco de comprensión que evita la atribución moral del problema al niño ("es flojo", "no le interesa"). La línea entre explicación y excusa es fina, y recorrerla con sensatez requiere una sofisticación epistemológica que la formación docente rara vez proporciona pero que la neuroeducación, si aspira a ser algo más que una moda, debe cultivar.

### **1.7. El cerebro infantil como sistema dinámico: implicaciones para repensar la enseñanza desde la biología**

El recorrido trazado en las secciones precedentes permite formular una imagen del cerebro infantil que difiere sustancialmente de las representaciones estáticas y compartimentalizadas que predominan tanto en los manuales de pedagogía tradicional como en la literatura divulgativa. El cerebro del niño que asiste a la educación básica no es un recipiente que se llena, ni un músculo que se fortalece con el ejercicio, ni un computador que procesa información según algoritmos fijos. Es, más bien, un sistema dinámico en desarrollo constante, cuya organización estructural y funcional cambia en respuesta a la interacción entre programas madurativos genéticamente orientados y experiencias ambientales entre las cuales la experiencia escolar ocupa un lugar cuantitativamente predominante.

La teoría de los sistemas dinámicos, aplicada al desarrollo cognitivo por Thelen y Smith (1994) y actualizada por Spencer et al. (2021), ofrece un marco conceptual que captura mejor la realidad del cerebro infantil que los modelos lineales de desarrollo por etapas. Desde esta perspectiva, el aprendizaje no avanza de forma monótona y progresiva, sino que exhibe discontinuidades, regresiones aparentes, reorganizaciones súbitas y sensibilidad a las condiciones iniciales. Un niño que parece haber comprendido un concepto un día y muestra confusión al día siguiente no está "retrocediendo": su cerebro está atravesando un proceso de reorganización en el que la representación anterior se desestabiliza para dar lugar a una representación más sofisticada que aún no se ha consolidado. Fischer y Bidell (2006) denominaron a estos fenómenos "oleadas de desarrollo" (developmental webs) y argumentaron

que las trayectorias cognitivas individuales son mucho más irregulares de lo que los promedios grupales sugieren.

Un aspecto de la teoría de sistemas dinámicos que tiene una resonancia particular con la experiencia cotidiana de los docentes es el concepto de "atractores": estados hacia los cuales un sistema tiende a converger. Un niño que ha aprendido un algoritmo de sustracción por reagrupamiento pero recurre espontáneamente al conteo con los dedos cuando se siente presionado por el tiempo está exhibiendo un fenómeno interpretable como la persistencia de un atractor antiguo que compite con el atractor nuevo aún no consolidado. El atractor antiguo el conteo con los dedos es más estable porque ha sido reforzado durante más tiempo y sus circuitos neuronales están más mielinizados; el atractor nuevo el algoritmo formal requiere más práctica distribuida para alcanzar un nivel de estabilidad equivalente. Esta lectura transforma lo que el docente podría interpretar como fracaso o pereza en un fenómeno esperable y manejable: la competencia entre representaciones neurales con distintos grados de consolidación.

La naturaleza dinámica del cerebro infantil tiene implicaciones concretas para tres dimensiones de la práctica pedagógica. La primera concierne a la evaluación: si el desarrollo no es lineal y si un mismo niño puede mostrar desempeños cualitativamente diferentes en momentos sucesivos dependientes del estado de consolidación de sus redes neurales, las evaluaciones puntuales y aisladas proporcionan una fotografía que puede captar un valle transitorio en lugar de la tendencia general; la evaluación formativa y continua, que múltiples muestras del desempeño del alumno a lo largo del tiempo componen, se ajusta mejor a la realidad neurocognitiva del desarrollo. Black y Wiliam (1998) argumentaron a favor de la evaluación formativa desde la evidencia pedagógica; la neurociencia del desarrollo refuerza su argumento al mostrar que la variabilidad intraindividual en el rendimiento es una característica normal del cerebro en desarrollo, no un artefacto de una evaluación mal diseñada.

La segunda implicación concierne al diseño de las secuencias didácticas. Si la consolidación sináptica requiere ciclos de activación, reposo y reactivación; si la mielinización de los circuitos implicados en una habilidad depende de su uso repetido pero distribuido en el tiempo; si la poda sináptica elimina las conexiones que no se refuerzan con la práctica, entonces un currículo que presenta un contenido durante dos semanas y luego no vuelve a tocarlo durante meses está operando contra la lógica biológica del aprendizaje. Los principios de la práctica espaciada, la intercalación de contenidos y la recuperación activa, que cuentan con respaldo convergente desde la psicología cognitiva y la neurociencia (Dunlosky et al., 2013; Pan et al., 2023), deberían informar la estructura temporal del currículo, no solo las técnicas de estudio

que se recomiendan al alumno. Roediger y Butler (2011) demostraron que el efecto de la práctica de recuperación recobrar activamente la información de la memoria en lugar de releerla pasivamente produce una consolidación más robusta y más resistente al olvido, un principio con fundamento en la reconsolidación sináptica que cada acto de recuperación activa desencadena.

La tercera implicación, quizá la más profunda, concierne a la concepción misma de lo que significa enseñar. Si enseñar es, en último término, facilitar procesos de reorganización sináptica, mielinización selectiva y refinamiento de la conectividad funcional en el cerebro del alumno, entonces la calidad de la enseñanza no puede medirse exclusivamente por la cantidad de información transmitida ni por el cumplimiento de una planificación predeterminedada. La enseñanza de calidad, desde la perspectiva neurobiológica, es aquella que ofrece al cerebro en desarrollo los estímulos adecuados en el momento oportuno, respeta los ritmos madurativos diferenciales de cada alumno, incorpora la dimensión emocional como componente constitutivo del aprendizaje y no como adorno motivacional, y reconoce que el movimiento, el sueño, la nutrición y la relación social no son periferias del acto educativo sino moduladores directos de la biología del aprendizaje.

El paso del dato neurocientífico al aula exige, como se ha argumentado, prudencia epistemológica y resistencia a los neuromitos, pero también exige ambición intelectual. Limitarse a la precaución y denunciar los mitos sin ofrecer una visión constructiva dejaría a la neuroeducación en una posición puramente reactiva. La visión que este libro propone es la de un docente que comprende los mecanismos neurobiológicos del aprendizaje no para aplicar recetas derivadas del laboratorio, sino para tomar decisiones pedagógicas más informadas, más flexibles y más empáticas. Un docente que sabe que la corteza prefrontal de sus alumnos de primer grado está lejos de completar su maduración no reducirá sus expectativas, pero las calibrará: ofrecerá andamiajes externos para las funciones ejecutivas que el cerebro del niño aún no puede sostener internamente instrucciones paso a paso, recordatorios visuales, rutinas predecibles y los retirará gradualmente a medida que la maduración y la experiencia permitan una autorregulación creciente. Un docente que entiende la curva de U invertida de la relación entre catecolaminas y función prefrontal no tratará de eliminar todo estrés del aula un nivel moderado de desafío es necesario para la activación dopaminérgica que facilita el aprendizaje, pero evitará las prácticas que generan estrés tóxico: la humillación pública, la presión temporal excesiva, la comparación competitiva constante. Un docente que conoce la poda sináptica no intentará "llenar" el cerebro de sus alumnos con la mayor cantidad posible de información antes de que "se cierren las ventanas", pero sí comprenderá que la calidad de las experiencias que

proporciona tiene un impacto duradero sobre la microestructura cerebral, y esa comprensión conferirá una gravedad y una dignidad a su trabajo cotidiano que pocas otras perspectivas pueden igualar.

Cada uno de estos temas será desarrollado en los capítulos siguientes, comenzando, en el Capítulo 2, con un examen detallado de la plasticidad cerebral y los períodos sensibles, dos conceptos cuya comprensión precisa resulta indispensable para cualquier docente que aspire a tomar decisiones pedagógicas informadas por la ciencia del cerebro. La plasticidad, como se verá, no es un atributo genérico del cerebro que está "siempre presente" de la misma manera, sino un conjunto de mecanismos diferenciados que operan con intensidad y modalidad variables según la edad, la región cerebral implicada, el tipo de experiencia y el estado fisiológico del organismo. Comprender esas diferencias permitirá al docente mover su práctica desde la intuición hacia la intervención informada, sin caer en el cientificismo ingenuo que confunde un hallazgo de laboratorio con una prescripción didáctica.

## **CAPÍTULO 2**

**Plasticidad cerebral y períodos sensibles: implicaciones para la enseñanza en educación  
básica**

## **Introducción**

El cerebro humano no llega al mundo como una estructura acabada ni como una tabula rasa que simplemente espera estímulos para llenarse de contenido. Lo que la investigación neurocientífica ha revelado durante las últimas tres décadas es algo considerablemente más sofisticado: el encéfalo infantil constituye un sistema biológico que se autoconstruye en interacción permanente con las experiencias que el entorno le provee, y esa capacidad de autoconfiguración lo que la literatura denomina plasticidad cerebral no opera de manera uniforme ni ilimitada, sino que atraviesa fases de mayor o menor receptividad cuya comprensión resulta decisiva para quien enseña. Comprender la plasticidad no es un ejercicio de erudición neurobiológica desconectado de la práctica docente; por el contrario, las decisiones que un maestro toma cada día sobre qué enseñar, cuándo enseñarlo y cómo organizar la experiencia de aprendizaje descansan, lo sepa o no, sobre los mecanismos plásticos que el cerebro del estudiante despliega para incorporar información nueva, reorganizar circuitos existentes y, en ocasiones, compensar daños o carencias.

Este capítulo se propone recorrer los fundamentos de la plasticidad cerebral con una mirada que privilegie la traducción pedagógica sin sacrificar la precisión científica. El recorrido inicia en el nivel molecular de la sinapsis, donde operan los mecanismos de potenciación y depresión que sostienen tanto el aprendizaje como el olvido, y avanza hacia las categorías funcionales de plasticidad que la literatura ha distinguido: experiencia-expectante, experiencia-dependiente y compensatoria. A partir de esas bases, la discusión se desplaza hacia la diferenciación entre períodos críticos y períodos sensibles una distinción que, mal interpretada, ha generado presiones curriculares innecesarias y, peor aún, ha alimentado el neuromito de que "todo se juega antes de los tres años". El análisis de la evidencia longitudinal reciente sobre las ventanas de oportunidad para el lenguaje, la cognición numérica y las competencias socioemocionales dará paso a una reflexión sobre la plasticidad maladaptativa que el estrés tóxico puede producir en el cerebro escolar, y el capítulo cerrará con orientaciones didácticas que permitan al docente diseñar experiencias de aprendizaje coherentes con lo que sabemos sobre la capacidad reorganizativa del cerebro entre los seis y los doce años.

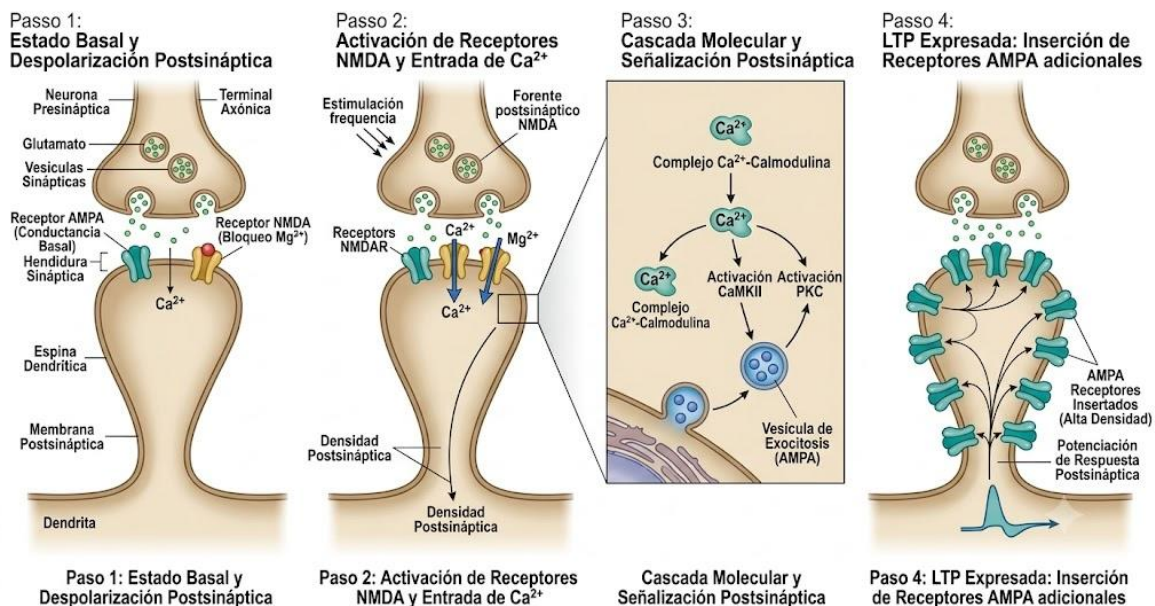
### **2.1. Plasticidad sináptica: mecanismos de potenciación a largo plazo y depresión sináptica como sustratos del aprendizaje y el olvido**

Cualquier acto de aprendizaje, desde memorizar una tabla de multiplicar hasta interiorizar las reglas de convivencia del aula, tiene un correlato sináptico. La sinapsis ese

espacio funcional donde una neurona transmite información a otra mediante la liberación de neurotransmisores no es una estructura estática: su eficacia puede aumentar o disminuir en función de la actividad que la atraviesa, y esa modificabilidad constituye el sustrato celular más elemental de lo que llamamos aprender y olvidar. Timothy Bliss y Terje Lømo documentaron este fenómeno por primera vez en 1973 al demostrar que la estimulación repetida de alta frecuencia en las fibras del hipocampo de un conejo producía un aumento duradero en la fuerza de la transmisión sináptica, un proceso que denominaron potenciación a largo plazo o LTP por sus siglas en inglés (Bliss y Lømo, 1973). Aquel hallazgo inaugural abrió un campo de investigación que, medio siglo después sigue produciendo descubrimientos con implicaciones directas para la comprensión del aprendizaje.

**Figura 6**

*Mecanismo de Potenciación a Largo Plazo (LTP)*



La LTP opera fundamentalmente a través de receptores glutamatérgicos, en particular los receptores NMDA, cuya activación requiere dos condiciones simultáneas: la liberación de glutamato por la neurona presináptica y la despolarización suficiente de la neurona postsináptica. Esa coincidencia temporal es lo que los neurocientíficos llaman detección de coincidencia, y explica por qué la práctica repetida y la asociación temporal entre estímulos fortalecen las conexiones neurales. Cuando el receptor NMDA se activa, permite la entrada de iones de calcio que desencadenan cascadas intracelulares de fosforilación, las cuales a su vez promueven la inserción de nuevos receptores AMPA en la membrana postsináptica, incrementando así la sensibilidad de esa sinapsis a futuras estimulaciones (Malenka y Bear,

2004). La fase tardía de la LTP involucra además síntesis de nuevas proteínas y remodelación estructural de las espinas dendríticas, lo que la convierte en un mecanismo de consolidación que trasciende la mera activación transitoria y se inscribe en cambios morfológicos perdurables. Investigaciones recientes han confirmado que estas modificaciones estructurales son detectables mediante técnicas de microscopía de dos fotones in vivo y que su magnitud correlaciona con la estabilidad del recuerdo formado (Bhatt et al., 2009; Hayashi-Takagi et al., 2015).

Pero el cerebro no solo necesita fortalecer sinapsis; también necesita debilitarlas selectivamente, y ahí interviene el proceso complementario de depresión sináptica a largo plazo o LTD. La LTD se induce típicamente mediante estimulación de baja frecuencia y opera reduciendo el número de receptores AMPA en la membrana postsináptica, lo que disminuye la eficacia de la transmisión (Collingridge et al., 2010). Lejos de ser un defecto del sistema, la LTD cumple funciones adaptativas indispensables: permite el olvido de información irrelevante, facilita la flexibilidad cognitiva al debilitar asociaciones que ya no son útiles, y previene la saturación de las redes neurales. Un cerebro que solo potenciara sinapsis sin poder deprimirlas terminaría en un estado epileptiforme, incapaz de discriminar señal de ruido. La investigación de Nabavi et al. (2014) demostró experimentalmente en roedores que la inactivación selectiva de sinapsis potenciadas mediante protocolos de LTD borraba memorias de miedo condicionado, y que la re-potenciación de esas mismas sinapsis restauraba el recuerdo, confirmando así que LTP y LTD constituyen los mecanismos causales no meramente correlativos de la formación y extinción de memorias.

Para el docente de educación básica, estas distinciones moleculares traducen una lección pedagógica que, aunque pueda parecer obvia, rara vez se enuncia con su debida fundamentación neurocientífica: la repetición espaciada fortalece conexiones, pero la mera repetición sin variación contextual puede producir un aprendizaje frágil que no resista la transferencia a situaciones nuevas. Los trabajos de Cepeda et al. (2006), ampliados recientemente por Rawson y Dunlosky (2022), han mostrado que el efecto de espaciado funciona precisamente porque intercala períodos de olvido parcial es decir, de cierta LTD que obligan al cerebro a re-potenciar las sinapsis relevantes cada vez con mayor eficiencia. Cada ciclo de debilitamiento y re-fortalecimiento produce una traza sináptica más robusta que la anterior. La dosificación del aprendizaje en el aula, entonces, no responde solo a una conveniencia logística sino a una exigencia neurobiológica: el cerebro consolida mejor cuando alterna activación intensa con períodos de descanso o cambio de actividad que permiten procesos de depuración sináptica.

Otro mecanismo que conecta la plasticidad sináptica con la práctica docente es la metaplasticidad, un concepto propuesto por Abraham y Bear (1996) que designa la capacidad de la historia previa de actividad sináptica para modificar el umbral de inducción de futura LTP o LTD. Dicho de otro modo, lo que una sinapsis ha experimentado antes condiciona cómo responderá a estimulaciones posteriores. Esta propiedad tiene consecuencias pedagógicas directas: un estudiante cuyas experiencias previas de aprendizaje han sido frustrantes o aversivas no parte del mismo punto que otro cuya historia académica ha sido gratificante, y no solo por razones motivacionales o emocionales, sino porque sus umbrales sinápticos de plasticidad pueden haberse desplazado de maneras que dificultan o facilitan la adquisición de nuevos contenidos. La investigación de Bhatt et al. (2022) ha mostrado que los umbrales metaplásticos en regiones prefrontales se ven alterados por experiencias de estrés crónico durante la infancia, un hallazgo que conecta directamente con la discusión sobre plasticidad maladaptativa que abordaremos más adelante.

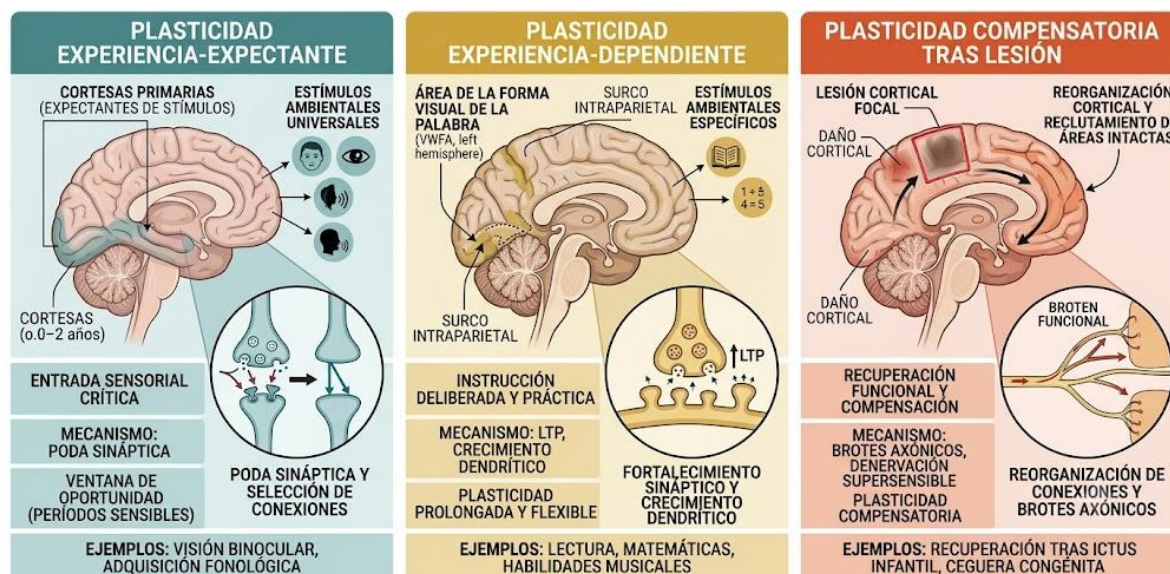
## **2.2. Tipos de plasticidad cerebral relevantes para la educación: plasticidad experiencia-expectante, experiencia-dependiente y plasticidad compensatoria**

La taxonomía clásica propuesta por William Greenough y sus colegas a finales de los años ochenta distinguió dos modalidades fundamentales de plasticidad que dependen de la relación entre el organismo y su entorno (Greenough et al., 1987). Esa distinción, enriquecida por la investigación posterior, sigue siendo una de las herramientas conceptuales más potentes para que un educador comprenda por qué ciertos aprendizajes tienen ventanas temporales preferentes y otros pueden ocurrir a cualquier edad.

La plasticidad experiencia-expectante describe el proceso mediante el cual el cerebro en desarrollo genera un exceso de conexiones sinápticas y luego retiene selectivamente aquellas que reciben estimulación ambiental, podando las que permanecen inactivas. El cerebro "espera" ciertos tipos de input que son universales en la experiencia humana típica: estímulos visuales con patrones de contraste, sonidos del habla humana, contacto físico con cuidadores. Cuando esos estímulos llegan en el momento esperado, los circuitos correspondientes se estabilizan y maduran; cuando no llegan como documentaron los estudios pioneros de Hubel y Wiesel (1970) sobre la privación visual monocular en gatos las sinapsis no utilizadas se eliminan y la capacidad funcional asociada se deteriora, a veces de manera irreversible.

**Figura 7**

*Tipos de plasticidad cerebral en el desarrollo*



Los estudios del Bucharest Early Intervention Project con niños institucionalizados en Rumania proporcionaron la evidencia más contundente en humanos de que la privación severa de interacción social y estimulación sensorial durante los primeros años produce alteraciones medibles en el volumen de materia blanca, la conectividad frontolímbica y el funcionamiento ejecutivo, alteraciones que se atenúan parcialmente cuando los niños son colocados en familias de acogida antes de los dos años pero que persisten si la intervención ocurre después de esa ventana (Nelson et al., 2007; Humphreys et al., 2022).

La plasticidad experiencia-dependiente, por contraste, se refiere a la capacidad del cerebro para formar nuevas conexiones sinápticas y reorganizar circuitos en respuesta a experiencias que son únicas para cada individuo y que no están filogenéticamente anticipadas. Aprender a leer, dominar un instrumento musical, adquirir una segunda lengua con acento nativo o desarrollar habilidades de cálculo aritmético son ejemplos de plasticidad experiencia-dependiente: ninguna de estas competencias está programada en el genoma humano, pero el cerebro puede adquirirlas gracias a su capacidad para generar y estabilizar nuevas redes neurales cuando la experiencia apropiada se presenta de manera sostenida. Dehaene (2009) documentó con detalle cómo la adquisición de la lectura "recicla" regiones del giro fusiforme izquierdo originalmente especializadas en el reconocimiento de objetos y caras para crear lo que denominó la "caja de letras" del cerebro, un ejemplo elocuente de cómo la experiencia cultural redirige circuitos que la evolución no diseñó para esa función. La distinción educativa es profunda: mientras que la plasticidad experiencia-expectante exige que el entorno provea

inputs universales mínimos en ventanas temporales definidas, la plasticidad experiencia-dependiente es más flexible temporalmente pero requiere instrucción deliberada, práctica sostenida y retroalimentación cualificada para producir cambios duraderos.

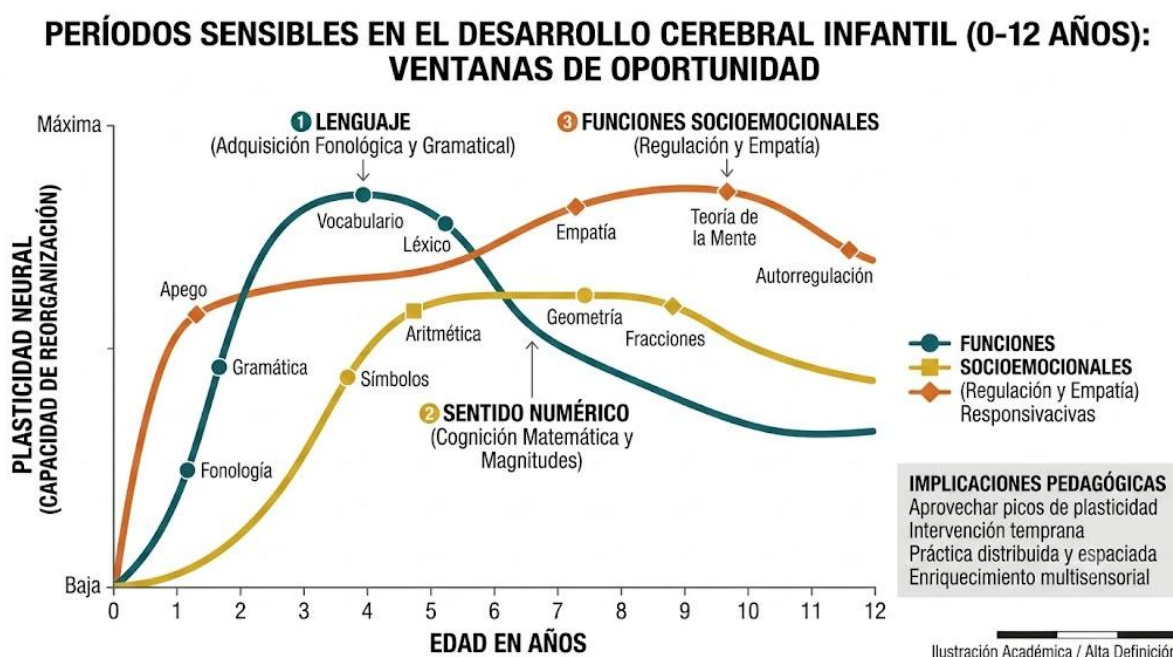
A estas dos modalidades la literatura contemporánea ha añadido una tercera categoría con relevancia educativa directa: la plasticidad compensatoria, que designa la capacidad de regiones cerebrales intactas para asumir funciones que han sido dañadas o que nunca se desarrollaron típicamente en sus regiones habituales. Los estudios con personas con discapacidad visual congénita han revelado que la corteza occipital, normalmente dedicada al procesamiento visual, se recluta para tareas táctiles y lingüísticas cuando la visión está ausente desde el nacimiento (Bedny, 2017). En el contexto educativo, la plasticidad compensatoria opera en niños con lesiones cerebrales perinatales, donde el hemisferio no dañado puede reorganizarse para sostener funciones lingüísticas que típicamente lateralizan al hemisferio izquierdo (Anderson et al., 2011). También opera, aunque de formas menos dramáticas, en estudiantes con trastornos del aprendizaje cuyo cerebro desarrolla rutas alternativas cuando las vías típicas de procesamiento presentan disfunciones: los lectores con dislexia, por ejemplo, muestran una hiperactivación de regiones frontales derechas que compensan parcialmente la hipoactivación de áreas temporoparietales izquierdas (Shaywitz y Shaywitz, 2020). Hoeft et al. (2011) demostraron que la activación de estas regiones compensatorias en niños con dislexia predecía mejor la ganancia lectora futura que las propias medidas de las regiones típicamente asociadas a la lectura, un hallazgo que subraya que la plasticidad compensatoria no es un sustituto deficiente del procesamiento típico sino un recurso genuino del cerebro para encontrar rutas alternativas hacia la competencia funcional.

La triple distinción entre plasticidad experiencia-expectante, experiencia-dependiente y compensatoria ofrece al docente un marco para interpretar fenómenos que observa cotidianamente: por qué ciertos estudiantes que han sufrido privación estimular temprana llegan al aula con retrasos que la instrucción convencional no logra cerrar (déficit de plasticidad experiencia-expectante), por qué la práctica deliberada y la instrucción explícita son necesarias para competencias culturales como la lectura y la escritura (plasticidad experiencia-dependiente), y por qué algunos estudiantes con condiciones neurológicas documentadas logran rendimientos que desafían los pronósticos si reciben intervenciones tempranas y apropiadas (plasticidad compensatoria). Comprender estas tres lógicas plásticas evita tanto el optimismo ingenuo de pensar que "cualquier cerebro puede aprender cualquier cosa en cualquier momento" como el determinismo de asumir que los déficits tempranos son sentencias irrevocables.

### 2.3. Períodos sensibles y períodos críticos: una distinción que transforma la planificación curricular

**Figura 8**

*Ventanas de oportunidad y períodos sensibles*



Durante décadas, los términos "período crítico" y "período sensible" se usaron de manera intercambiable en la literatura, generando confusiones que trascendieron el ámbito académico y permearon los discursos de política educativa con consecuencias prácticas desafortunadas. Knudsen (2004) propuso una diferenciación que hoy goza de amplio consenso y que conviene recapitular con precisión. Un período crítico designa una ventana temporal durante la cual la experiencia es absolutamente necesaria para que un circuito neural se configure adecuadamente; si la experiencia relevante no ocurre dentro de esa ventana, la capacidad asociada se pierde de manera permanente o cuasi permanente. El ejemplo paradigmático sigue siendo la visión binocular: si un ojo no recibe estimulación visual adecuada durante los primeros años de vida debido a un estrabismo no corregido o a una catarata congénita, la corteza visual no desarrolla las columnas de dominancia ocular necesarias para la estereopsis, y esa función no se recupera con intervenciones posteriores.

Los períodos sensibles, en cambio, identifican ventanas de tiempo durante las cuales el cerebro muestra una receptividad aumentada a ciertos tipos de experiencia, de modo que el aprendizaje ocurre con mayor facilidad y menor costo energético, pero fuera de esa ventana la capacidad no se pierde sino que su adquisición se vuelve más lenta, más costosa y

frecuentemente menos completa. La adquisición fonológica de la lengua materna es un caso que ilustra bien esta distinción: Patricia Kuhl y sus colaboradores documentaron que la capacidad de los bebés para discriminar contrastes fonéticos de lenguas no nativas se reduce significativamente después de los diez meses de edad, no porque desaparezca la plasticidad del sistema auditivo sino porque el cerebro se sintoniza estadísticamente con los patrones sonoros del entorno lingüístico predominante (Kuhl, 2010). Esa sintonización perceptiva explica por qué un adulto puede aprender una segunda lengua con competencia gramatical y léxica pero raramente alcanza la precisión fonética de un hablante nativo, y por qué la exposición temprana a una segunda lengua tiene efectos sobre la discriminación fonológica que la exposición tardía no replica completamente (Werker y Hensch, 2015).

La distinción entre períodos críticos y sensibles tiene una consecuencia curricular que los diseñadores de programas educativos no deberían ignorar. Si la mayoría de las competencias académicas relevantes para la educación básica lectura, escritura, aritmética, razonamiento lógico, habilidades sociales se encuentran bajo la influencia de períodos sensibles y no de períodos críticos estrictos, entonces la ventana de oportunidad no se cierra abruptamente sino que se estrecha gradualmente. Esta perspectiva genera un doble mandato pedagógico: por un lado, aprovechar los momentos de máxima receptividad cerebral para introducir las experiencias de aprendizaje más relevantes; por otro, mantener la confianza en que las intervenciones tardías, aunque más costosas, no son fútiles. Takesian y Hensch (2013) mostraron que incluso los períodos críticos clásicos del sistema visual pueden reabrirse parcialmente mediante manipulaciones farmacológicas o ambientales que modifican el equilibrio entre excitación e inhibición cortical, un hallazgo que ha sido replicado recientemente en modelos animales mediante el enriquecimiento ambiental (Bhagya et al., 2022).

Un aspecto que la literatura reciente ha enfatizado es que los períodos sensibles no son fenómenos unitarios que afectan al cerebro como totalidad, sino que diferentes circuitos y regiones maduran en momentos distintos siguiendo cronogramas propios. La corteza visual primaria completa su período sensible principal durante los primeros años de vida, mientras que las regiones prefrontales, responsables de las funciones ejecutivas, mantienen una plasticidad sustancial hasta bien entrada la tercera década (Fuhrmann et al., 2015). Las regiones temporales implicadas en el procesamiento lingüístico muestran ventanas sensibles que se extienden por la primera década, y las áreas parietales involucradas en el procesamiento numérico parecen tener una receptividad aumentada durante los años de educación primaria (Ansari, 2012; Matejko y Ansari, 2015). Esta heterocronía madurativa tiene implicaciones

profundas para la secuenciación curricular: sugiere que la organización temporal de los contenidos escolares debería, al menos parcialmente, acompañarse con la maduración diferencial de los circuitos cerebrales que los soportan, una idea que Tokuhamma-Espinosa (2019) ha desarrollado bajo el concepto de "pedagogía informada por la cronobiología del desarrollo neural".

#### **2.4. Ventanas de oportunidad para el lenguaje, la numerosidad y las funciones socioemocionales: qué dice la evidencia longitudinal reciente**

La investigación longitudinal permite trazar con cierta precisión las trayectorias de maduración de los circuitos cerebrales que sustentan las tres grandes familias de competencias que la escuela primaria debe cultivar: las lingüísticas, las lógico-matemáticas y las socioemocionales. Los estudios de cohortes que combinan evaluaciones neuropsicológicas periódicas con técnicas de neuroimagen estructural y funcional han producido, durante la última década, un mapa temporal cada vez más detallado de estas ventanas, aunque conviene mantener la cautela ante la tentación de convertir datos poblacionales en prescripciones individuales rígidas.

Respecto al lenguaje, la ventana sensible para la adquisición fonológica se concentra, como ya mencionamos, en el primer año de vida, pero la ventana para la adquisición gramatical se extiende considerablemente más. Los datos del estudio longitudinal de Hartshorne et al. (2018), que analizó la competencia gramatical en más de 600.000 participantes, sugirieron que la capacidad para adquirir la gramática de una lengua con competencia nativa se mantiene relativamente abierta hasta aproximadamente los diecisiete o dieciocho años, aunque la velocidad y eficiencia de adquisición comienzan a declinar después de los diez. Para la lectoescritura, los estudios de neuroimagen longitudinal de Dehaene-Lambertz et al. (2018) han documentado que la especialización de la región occipitotemporal izquierda para el reconocimiento de palabras escritas se produce con mayor rapidez y menor interferencia entre los cinco y los ocho años, aunque la instrucción lectora puede producir reorganización cortical significativa a cualquier edad, como lo demuestran los programas de alfabetización de adultos estudiados por Dehaene et al. (2015). La relevancia de estos hallazgos para la educación básica es directa: la enseñanza formal de la lectura se inicia en un momento de alta receptividad cerebral para esa competencia, y el docente debe ser consciente de que está operando dentro de una ventana neurofisiológica favorable cuyo aprovechamiento depende de la calidad de la instrucción, no solo de la exposición pasiva a textos.

La cognición numérica presenta un panorama algo diferente. Estudios con bebés han documentado que la capacidad para discriminar cantidades aproximadas lo que la literatura denomina sistema numérico aproximado o ANS está presente desde los primeros meses de vida y parece tener una base filogenética compartida con otros primates (Feigenson et al., 2004). La precisión de este sistema mejora progresivamente durante la infancia y muestra correlaciones modestas pero consistentes con el rendimiento matemático escolar (Schneider et al., 2017). La investigación longitudinal de Matejko y Ansari (2015) mostró que la activación del surco intraparietal durante tareas de comparación numérica cambia cualitativamente entre los seis y los doce años, transitando de una activación difusa y bilateral a una respuesta más focalizada y lateralizada que se asocia con mayor eficiencia en el cálculo. Ese patrón de especialización progresiva sugiere que los años de la educación primaria constituyen un período sensible no crítico para el establecimiento de representaciones numéricas exactas y su vinculación con los símbolos aritméticos. Los trabajos recientes de Kuhl et al. (2023) han sugerido que la exposición temprana a experiencias de manipulación concreta de cantidades durante los primeros años escolares produce efectos sobre la conectividad parietofrontal que persisten en evaluaciones realizadas tres años después, un hallazgo coherente con las propuestas pedagógicas que abogan por el uso intensivo de material concreto en la enseñanza de las matemáticas en los primeros grados.

Las funciones socioemocionales presentan la ventana temporal más extendida y, paradójicamente, la menos estudiada con metodologías longitudinales rigurosas. La maduración de la amígdala, el córtex prefrontal ventromedial y la ínsula circuitos centrales para la empatía, la regulación emocional y la cognición social se extiende a lo largo de toda la infancia y la adolescencia, con un pico de reorganización que la investigación ubica entre los nueve y los catorce años (Blakemore, 2018). Los datos del estudio ABCD (Adolescent Brain Cognitive Development), la cohorte longitudinal más grande del desarrollo cerebral jamás realizada en Estados Unidos, han revelado que la conectividad funcional entre la amígdala y el córtex prefrontal a los nueve y diez años predice la capacidad de regulación emocional y la frecuencia de conductas externalizantes dos años después, sugiriendo que la transición entre la infancia media y la preadolescencia constituye un período de particular sensibilidad para la consolidación de los circuitos de regulación afectiva (Gee et al., 2022). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de que la educación básica incorpore de manera sistemática el entrenamiento socioemocional durante los años intermedios, no solo como una adición curricular bienintencionada sino como una intervención que capitaliza una ventana neuromadurativa genuina.

## **2.5. El mito del "todo se decide antes de los tres años": matizaciones neurocientíficas sobre la capacidad plástica del cerebro escolar entre los 6 y los 12 años**

Pocas ideas han causado tanto daño en el diálogo entre neurociencia y educación como la creencia de que los primeros tres años de vida determinan de manera irreversible la arquitectura cerebral del individuo. Esta noción, que Bruer (1999) desmontó con elegancia en su ya clásico "The Myth of the First Three Years", se ha resistido a morir y sigue apareciendo en manuales de formación docente, discursos de política pública y materiales de divulgación. Su persistencia se explica, en parte, porque descansa sobre datos reales malinterpretados: la sinaptogénesis alcanza su pico máximo alrededor de los dos años, el proceso de poda sináptica es más intenso durante la primera infancia, y la privación severa durante esos años produce efectos documentados y a veces irreversibles. Pero extrapolar de esos hechos la conclusión de que el cerebro del niño escolar ha perdido su capacidad plástica es un error que la evidencia actual no sostiene.

Los estudios de neuroimagen estructural han demostrado que el cerebro entre los seis y los doce años experimenta cambios madurativos de gran envergadura que van mucho más allá de una mera consolidación de lo ya establecido. La mielinización de los tractos de sustancia blanca que conectan regiones frontales con regiones parietales y temporales continúa activamente durante toda la edad escolar, y la velocidad de esa mielinización correlaciona con mejoras medibles en velocidad de procesamiento, capacidad de memoria de trabajo y eficiencia en funciones ejecutivas (Lebel y Deoni, 2018). Los datos del estudio longitudinal de Mills et al. (2021) mostraron que el grosor cortical en regiones prefrontales laterales sigue una trayectoria de adelgazamiento progresivo entre los siete y los doce años que se asocia con la poda selectiva de sinapsis excedentes y con mejoras concomitantes en el control inhibitorio. Ese adelgazamiento no es una pérdida de capacidad sino un refinamiento: el cerebro escolar está activamente esculpiéndose, eliminando conexiones redundantes y fortaleciendo las que la experiencia selecciona como relevantes.

Quizá la evidencia más contundente contra el determinismo de los tres primeros años proviene de los estudios de intervención que han documentado cambios cerebrales estructurales y funcionales significativos en niños de edad escolar como resultado de programas educativos específicos. El entrenamiento en lectura produce modificaciones detectables en la sustancia blanca del fascículo arqueado en niños de seis a nueve años (Yeatman et al., 2012), el entrenamiento musical genera cambios en el cuerpo calloso y en la corteza auditiva de niños que comienzan a practicar después de los siete años (Habibi et al., 2018), y los programas de

entrenamiento en funciones ejecutivas inducen cambios funcionales en la activación prefrontal de niños entre ocho y doce años (Diamond y Ling, 2020). Ninguno de estos hallazgos sería posible si el cerebro escolar hubiera agotado su repertorio plástico. La investigación de Takesian y Hensch (2013) demostró que la plasticidad cortical no desaparece después de los períodos críticos tempranos sino que se regula mediante mecanismos inhibitorios mediados por interneuronas gabaérgicas, redes perineuronales y factores moleculares como el BDNF. Estos mecanismos pueden modularse por la experiencia, lo que significa que un ambiente de aprendizaje suficientemente estimulante y desafiante tiene el potencial de mantener abiertos circuitos de plasticidad que de otro modo se cerrarían.

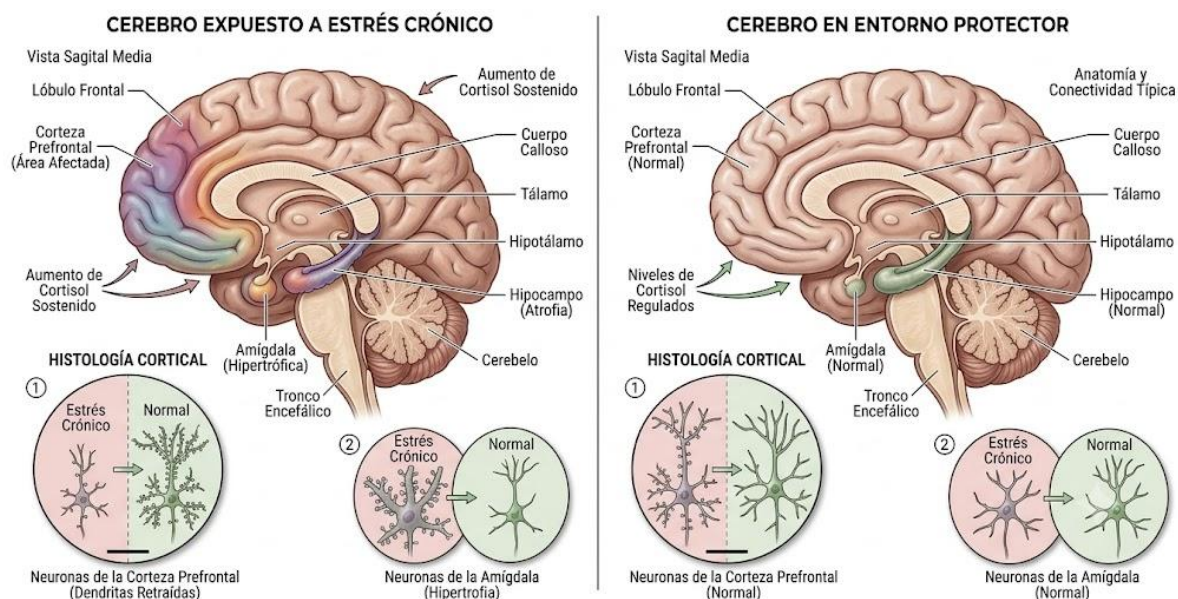
La conclusión para el docente de educación básica es doble y debe sostener ambos polos sin colapsar en ninguno. Por una parte, los primeros años de vida son genuinamente importantes y las experiencias tempranas dejan huellas que condicionan, aunque no determinan, el desarrollo posterior. Por otra parte, el cerebro del niño que ingresa a la educación básica posee una capacidad plástica formidable que la instrucción deliberada puede y debe aprovechar. Abandonar a un estudiante por considerar que "ya es tarde" para intervenir sobre sus dificultades equivale a ignorar la evidencia que documenta la remodelabilidad del cerebro escolar, y constituye una omisión pedagógica tanto como ética.

## **2.6. Plasticidad maladaptativa y estrés tóxico: cuando el entorno erosiona la arquitectura cerebral del estudiante**

La plasticidad cerebral no tiene una valencia moral inherente: el mismo mecanismo que permite al cerebro aprender a leer le permite también aprender el miedo, la hipervigilancia y la desconfianza. Cuando un niño crece en un entorno marcado por la adversidad crónica violencia intrafamiliar, negligencia, pobreza extrema, exposición sostenida a conflicto armado, su cerebro no permanece indiferente: se remodela activamente para adaptarse a ese entorno hostil, y las adaptaciones resultantes, aunque funcionalmente lógicas como respuestas de supervivencia, frecuentemente interfieren con las demandas cognitivas del aprendizaje escolar. Shonkoff et al. (2012) acuñaron el concepto de estrés tóxico para designar la activación prolongada e intensa del sistema de respuesta al estrés sin el amortiguamiento de relaciones adultas estables y protectoras, distinguiéndolo del estrés positivo (moderado, de corta duración y con apoyo relacional disponible) y del estrés tolerable (más intenso pero acotado en el tiempo y con soporte relacional).

**Figura 9**

*Efecto del estrés tóxico en la arquitectura cerebral*



Los mecanismos mediante los cuales el estrés tóxico altera la arquitectura cerebral son múltiples y bien documentados. La exposición crónica a cortisol, la principal hormona del estrés, produce una reducción del volumen hipocampal por retracción de las arborizaciones dendríticas de las neuronas piramidales de la región CA3, un efecto descrito extensamente por McEwen (2017) y confirmado en niños mediante estudios de resonancia magnética estructural (Luby et al., 2013). La amígdala, en contraste, muestra una hipertrofia dendrítica bajo estrés crónico, lo que se traduce en una hipersensibilidad a las señales de amenaza y una tendencia a interpretar estímulos ambiguos como peligrosos (Tottenham y Galván, 2016). La corteza prefrontal, por su parte, sufre una disminución de la complejidad dendrítica y una reducción de la densidad de espinas sinápticas que compromete las funciones ejecutivas, la memoria de trabajo y la capacidad de regulación emocional (Arnsten, 2015). El resultado neto es un cerebro que ha redistribuido sus recursos plásticos hacia la detección de amenazas a expensas de las funciones reflexivas, analíticas y de aprendizaje que la escuela demanda.

La investigación longitudinal reciente ha añadido matices a este cuadro que el docente debe conocer. Humphreys et al. (2022), analizando datos del Bucharest Early Intervention Project con seguimiento hasta los dieciséis años, encontraron que los efectos de la adversidad temprana sobre el funcionamiento ejecutivo eran parcialmente mediados por la calidad de las relaciones de cuidado posteriores: los niños que habían sufrido privación institucional pero fueron colocados en familias de acogida de alta calidad antes de los veinticuatro meses mostraban, en la adolescencia, un perfil de conectividad frontolímbica más cercano al de los

niños nunca institucionalizados que al de los que permanecieron en instituciones. McLaughlin et al. (2021) propusieron un modelo dimensional de la adversidad que distingue entre los efectos de la privación (ausencia de estímulos esperados) y los de la amenaza (presencia de estímulos dañinos), argumentando que cada dimensión afecta circuitos cerebrales distintos y requiere estrategias de intervención diferenciadas. La privación tiende a afectar preferentemente los circuitos frontoestriales implicados en funciones ejecutivas y procesamiento de recompensas, mientras que la amenaza impacta con mayor intensidad los circuitos centrados en la amígdala e involucrados en el procesamiento emocional.

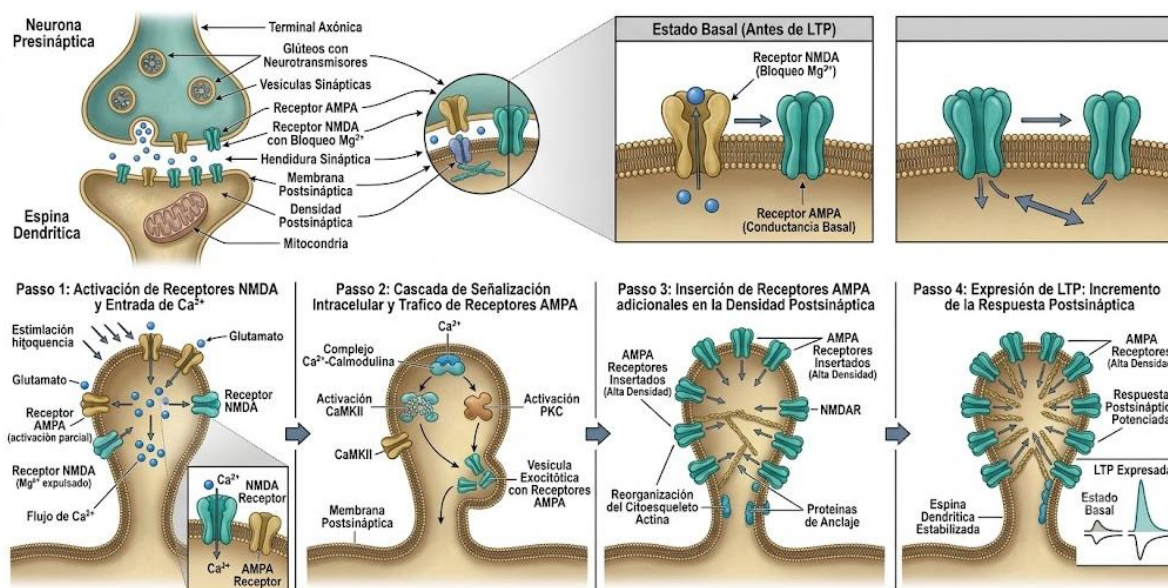
Para el docente, la implicación práctica más inmediata de este cuerpo de investigación es que muchos de los comportamientos disruptivos, las dificultades atencionales y la baja tolerancia a la frustración que observa en ciertos estudiantes no son necesariamente productos de "mala conducta" o "falta de voluntad" sino manifestaciones de un cerebro que se ha reorganizado plásticamente en respuesta a un entorno adverso. Esa reorganización no es irreversible la plasticidad compensatoria opera también aquí, pero requiere intervenciones que aborden simultáneamente la dimensión relacional (proveer vínculos seguros con adultos estables), la dimensión regulatoria (enseñar estrategias explícitas de regulación emocional y atencional) y la dimensión académica (ajustar las demandas cognitivas al nivel real de funcionamiento del estudiante, no al que su edad cronológica sugeriría). Los programas de intervención basados en la evidencia que integran estas tres dimensiones han mostrado efectos positivos tanto en medidas conductuales como en indicadores neurobiológicos, incluyendo normalización de patrones de conectividad frontolímbica (Loman et al., 2023).

## **2.7. Cómo diseñar experiencias de aprendizaje que aprovechen y protejan la capacidad reorganizativa del cerebro infantil**

Trasladar los principios de la plasticidad cerebral a orientaciones didácticas concretas exige evitar dos errores simétricos: el de la traducción literal, que pretende derivar recetas pedagógicas directamente de hallazgos neurocientíficos ignorando la complejidad del aula, y el de la metáfora vacía, que invoca la plasticidad como comodín retórico sin comprometerse con prescripciones específicas. Lo que ofrecemos a continuación son orientaciones informadas por la evidencia, no protocolos rígidos, y su implementación requerirá siempre la adaptación reflexiva del docente al contexto particular de su grupo.

**Figura 10**

*Ciclo de retroalimentación de la plasticidad y la práctica*



La primera orientación se deriva directamente de los mecanismos de LTP y LTD discutidos al inicio del capítulo: la dosificación temporal del aprendizaje debe favorecer la práctica espaciada sobre la práctica masiva. Cuando un docente concentra todo el trabajo sobre un contenido en una sola sesión intensiva y luego pasa al siguiente tema sin retornos programados, está privando al cerebro del estudiante de los ciclos de debilitamiento y re-fortalecimiento sináptico que producen trazas mnésicas duraderas. La recomendación, respaldada por la investigación de Rawson y Dunlosky (2022), es distribuir el trabajo sobre cada contenido en múltiples sesiones breves separadas por intervalos crecientes. Un esquema práctico para un aula de educación básica podría incluir un primer contacto con el contenido nuevo, un repaso al día siguiente, otro a la semana, otro a las dos semanas y un último al mes, variando cada vez el formato de la actividad resolución de problemas, explicación a un par, aplicación a un contexto diferente para evitar la mera repetición mecánica y favorecer la transferencia.

La segunda orientación concierne a la calidad de la retroalimentación. Los mecanismos de plasticidad experiencia-dependiente requieren que el cerebro reciba señales claras sobre la adecuación de su respuesta para poder ajustar sus patrones de activación. Una retroalimentación que se limita a clasificar la respuesta como "correcta" o "incorrecta" provee información binaria insuficiente para guiar la reorganización sináptica; una retroalimentación que identifica específicamente el componente del razonamiento que fue acertado y el que necesita revisión ofrece al cerebro una señal de error mucho más informativa. Hattie y Clarke

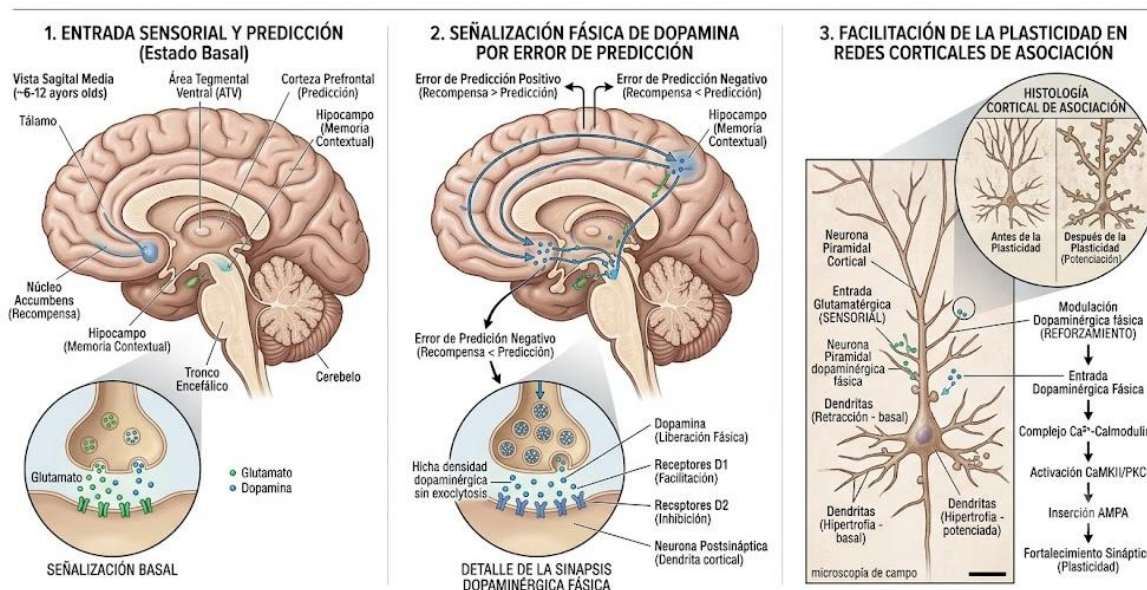
(2019) argumentaron que la retroalimentación más efectiva es la que reduce la distancia entre el desempeño actual y el desempeño deseado sin proporcionar directamente la respuesta, obligando al estudiante a reactivar y reajustar sus propios circuitos de procesamiento. Esa reactivación es, en términos neurobiológicos, una nueva oportunidad de potenciación sináptica que fortalece las conexiones que soportan la comprensión correcta y debilita las que sustentan el error.

La tercera orientación se relaciona con la sensibilidad temporal de las experiencias de aprendizaje. Si los circuitos de procesamiento fonológico muestran una receptividad aumentada durante los primeros años escolares, la instrucción en conciencia fonológica y decodificación lectora no debería posponerse hasta que el niño "esté maduro" una formulación que la evidencia no respalda sino ofrecerse de manera explícita, sistemática y temprana. De manera complementaria, si los circuitos prefrontales de control ejecutivo alcanzan un punto de inflexión en su maduración durante los años intermedios de la primaria, la introducción de actividades que demanden planificación, inhibición de respuestas prepotentes y flexibilidad cognitiva debería intensificarse progresivamente entre los ocho y los doce años, no relegarse a la educación secundaria. Diamond y Ling (2020) revisaron la evidencia disponible sobre programas de entrenamiento en funciones ejecutivas para niños en edad escolar y concluyeron que los programas más efectivos eran aquellos que desafiaban repetidamente los límites actuales de la capacidad ejecutiva del niño, incrementando la dificultad de manera gradual y sistemática, un principio que en terminología vigotskiana equivaldría a trabajar persistentemente en la zona de desarrollo próximo pero que en términos neurobiológicos se traduce como la provisión de niveles óptimos de desafío que mantienen activa la maquinaria de plasticidad sin sobrepasarla hasta el punto de generar estrés tóxico.

La cuarta orientación aborda la necesidad de proteger la capacidad plástica del cerebro infantil frente a las condiciones que la erosionan. El docente de educación básica no puede modificar las circunstancias socioeconómicas o familiares de sus estudiantes, pero puede crear un ambiente de aula que funcione como amortiguador relacional y como espacio de regulación. La investigación de Hamre y Pianta (2001), confirmada por estudios posteriores (Pianta et al., 2020), ha documentado que la calidad de la relación entre el docente y el estudiante opera como un factor protector frente a los efectos del estrés adverso, reduciendo los niveles de cortisol salival y mejorando los indicadores de funcionamiento ejecutivo en niños provenientes de contextos de alta adversidad. Un aula que ofrece rutinas predecibles, expectativas claras, relaciones afectivas seguras y oportunidades de éxito graduado no solo facilita el aprendizaje: protege los mecanismos de plasticidad que lo hacen posible.

**Figura 11**

*Procesamiento de recompensa y plasticidad experiencia-dependiente*



La quinta orientación se refiere a la incorporación del movimiento y la actividad física como facilitadores de la plasticidad cerebral. La investigación de Hillman et al. (2019) demostró que un programa de actividad física aeróbica de moderada intensidad aplicado durante el horario escolar producía mejoras significativas en el funcionamiento ejecutivo y en la conectividad de redes frontoparietales en niños de ocho a nueve años. El mecanismo subyacente involucra la liberación de factores neurotróficos, particularmente el BDNF (brain-derived neurotrophic factor), que promueve la supervivencia neuronal, la sinaptogénesis y la LTP en el hipocampo y la corteza prefrontal (Cotman et al., 2007). Para el docente, esto significa que las pausas activas, los juegos con componente motriz y la integración del movimiento en las actividades académicas no son distracciones del aprendizaje sino potenciadores de la plasticidad que lo sustenta.

La sexta y última orientación tiene que ver con la multisensorialidad. Los circuitos de plasticidad experiencia-dependiente se fortalecen cuando la experiencia de aprendizaje activa simultáneamente múltiples sistemas sensoriales y motores, porque la convergencia de señales provenientes de diferentes modalidades produce una potenciación sináptica más robusta que la estimulación unimodal (Shams y Seitz, 2008). Un estudiante que aprende una palabra nueva viéndola escrita, escuchando su pronunciación, trazándola con el dedo y utilizándola en una frase significativa está activando circuitos visuales, auditivos, motores y semánticos de manera simultánea, lo que genera múltiples trazas sinápticas que se refuerzan mutuamente y hacen el aprendizaje más resistente al olvido. James y Engelhardt (2012) demostraron que el acto de

escribir a mano activa regiones del circuito de lectura que la escritura en teclado no recluta, un hallazgo con implicaciones para la discusión contemporánea sobre la digitalización de la escritura en los primeros años escolares y que ha sido extendido por investigaciones recientes de Van der Meer y Van der Weel (2017) confirmando que los patrones electroencefalográficos durante la escritura manual difieren cualitativamente de los producidos por la escritura en tableta, con mayor desincronización en bandas theta y alfa que sugieren un procesamiento más profundo.

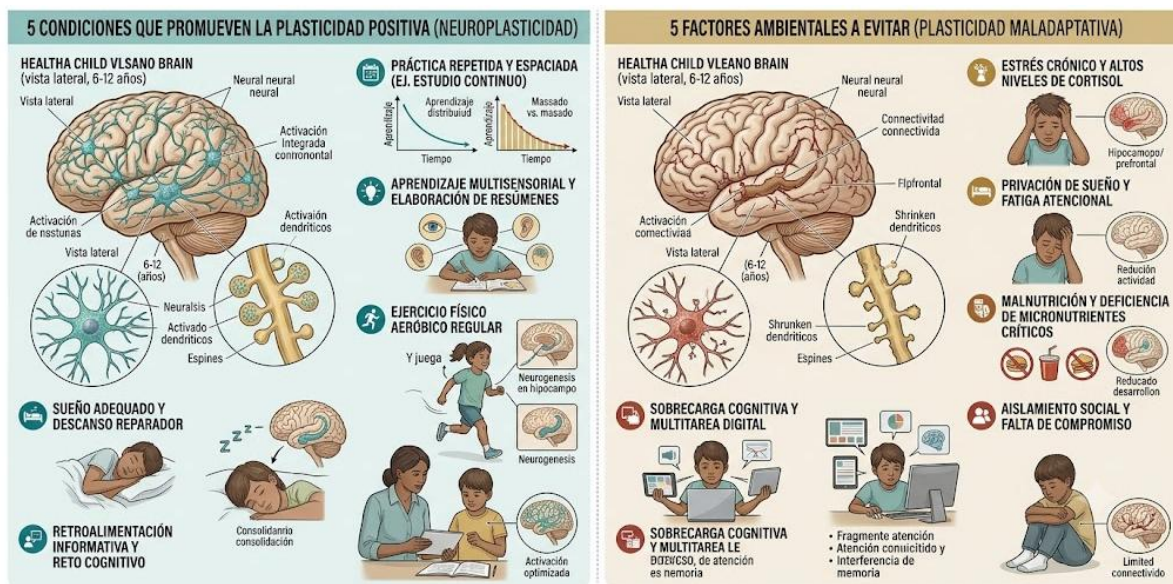
## **2.8. Cierre del capítulo. La plasticidad como promesa y como responsabilidad docente**

La plasticidad cerebral, recorrida desde sus mecanismos moleculares hasta sus expresiones comportamentales en el aula, revela una doble cara que el docente de educación básica no puede eludir. La cara luminosa dice que el cerebro del niño escolar es un sistema extraordinariamente maleable, capaz de reorganizarse en respuesta a la instrucción deliberada, de compensar parcialmente los efectos de la adversidad temprana, y de adquirir competencias complejas lectura, matemáticas, regulación emocional que no están predeterminadas genéticamente sino que emergen de la interacción entre la biología y la experiencia. Esa maleabilidad no se agota a los tres años ni a los seis: se extiende, con modulaciones regionales y temporales, a lo largo de toda la educación básica y más allá, ofreciendo ventanas de oportunidad que la pedagogía puede y debe aprovechar.

La cara sombría dice que esa misma maleabilidad hace al cerebro infantil vulnerable a las experiencias nocivas: el estrés tóxico, la privación estimular, las relaciones inseguras y los ambientes de aprendizaje hostiles producen remodelaciones plásticas que dificultan el rendimiento académico, la regulación emocional y la convivencia social. La plasticidad no distingue entre estímulos enriquecedores y estímulos dañinos: responde a ambos con la misma fidelidad mecánica, esculpiendo el cerebro a imagen del entorno que le toca habitar.

**Figura 12**

*Decálogo didáctico de protección y estimulación plástica*



Para el docente, estas dos caras configuran una responsabilidad que trasciende la dimensión técnica de su oficio y alcanza la dimensión ética. Si cada experiencia de aprendizaje que diseña tiene el potencial de modificar literalmente, físicamente los circuitos cerebrales de sus estudiantes, entonces la calidad de esa experiencia no es solo una cuestión de eficacia pedagógica sino de cuidado hacia un organismo en construcción. Un aula que ofrece desafío cognitivo graduado, retroalimentación informativa, seguridad emocional, oportunidades de movimiento y estimulación multisensorial está creando las condiciones para una plasticidad adaptativa que prepare al niño no solo para los exámenes del trimestre sino para las demandas cognitivas y emocionales de una vida entera de aprendizaje. Un aula que, por negligencia, rigidez o desconocimiento, somete al niño a monotonía, estrés evaluativo crónico, humillación o pasividad física está erosionando las bases neurobiológicas mismas del aprendizaje que pretende promover.

Los capítulos que siguen profundizarán en las dimensiones que este capítulo ha delineado de forma panorámica. El tercer capítulo examinará con detalle tres de los sistemas neurocognitivos que más directamente condicionan el rendimiento académico la atención, la memoria y las funciones ejecutivas, explorando sus bases neurales, su trayectoria de desarrollo en la infancia y las estrategias que el docente puede emplear para potenciarlos. Si la plasticidad que hemos explorado aquí establece que el cerebro puede cambiar, será la comprensión de esos sistemas la que nos dirá cómo hacerlo de manera que ese cambio sirva efectivamente al aprendizaje.

# **CAPÍTULO 3**

**Atención, memoria y funciones ejecutivas: pilares neurocognitivos del rendimiento académico**

## Introducción

Un niño de siete años permanece quieto ante un ejercicio de lectura durante apenas cuatro minutos antes de desviar la mirada hacia la ventana del aula. Su compañera de mesa, de la misma edad, ha logrado mantener el foco durante casi diez minutos, aunque al final de ese lapso comete errores que no habría cometido al principio. Un tercero, sentado al fondo, recuerda con precisión la instrucción que recibió ayer pero es incapaz de aplicarla cuando el formato del ejercicio cambia ligeramente. Una cuarta alumna, que comprendió perfectamente la explicación de la maestra hace veinte minutos, descubre al enfrentarse al ejercicio que ya no puede reconstruir los pasos que le fueron indicados. Estas escenas, tan rutinarias que casi ningún docente las registra como fenómenos dignos de análisis, encierran procesos neurocognitivos de una complejidad que la investigación de las últimas tres décadas ha ido desentrañando con resolución creciente: la atención como filtro dinámico que selecciona y prioriza información en un entorno saturado de estímulos, la memoria como sistema múltiple que codifica, consolida y recupera la experiencia transformándola en conocimiento transferible, y las funciones ejecutivas como el conjunto de procesos de control de orden superior que orquestan la conducta dirigida a metas, permiten la autorregulación y posibilitan el aprendizaje deliberado. Estos tres pilares no operan de forma aislada ni se despliegan de manera simultánea; constituyen un sistema funcional integrado cuya maduración, aún en curso durante toda la educación básica y buena parte de la adolescencia, determina en gran medida la capacidad de un estudiante para beneficiarse de la enseñanza formal.

La tradición pedagógica ha abordado durante mucho tiempo estos procesos desde la observación conductual el alumno que "no presta atención", que "no retiene lo que se le enseña", que "no sigue instrucciones simples", que "no piensa antes de actuar" sin disponer de un marco explicativo que permita comprender por qué ciertas estrategias didácticas fracasan precisamente con aquellos estudiantes que más las necesitan. La psicología educativa proporcionó descripciones valiosas de estos fenómenos, pero la neurociencia cognitiva del desarrollo ha añadido una capa de comprensión indispensable al revelar que la atención, la memoria y las funciones ejecutivas dependen de circuitos neuronales específicos cuya maduración sigue trayectorias temporales no lineales, moduladas tanto por la dotación genética como por la calidad de la experiencia ambiental (Zelazo, 2023). El docente que comprende estas trayectorias no se limita a exigir atención o repetir contenidos esperando un resultado diferente: diseña experiencias de aprendizaje que respetan los límites neurocognitivos del

cerebro infantil al tiempo que promueven, de forma deliberada e informada, su fortalecimiento progresivo.

El propósito de este capítulo consiste en recorrer la arquitectura neurocognitiva de estos tres procesos con suficiente detalle para que el lector pueda derivar, a partir de la evidencia, criterios pedagógicos operativos. No se trata de ofrecer recetas simplificadas la neuroeducación rigurosa desconfía de las soluciones universales, y con razón ni de sugerir que cada hallazgo de laboratorio tiene una aplicación directa e inmediata en el aula, sino de construir un razonamiento fundamentado que permita al docente tomar decisiones informadas sobre la organización temporal de la jornada, el diseño de las tareas, la secuenciación de los contenidos, el tipo de andamiaje cognitivo que cada momento del desarrollo requiere, y la calibración de expectativas académicas que sean al mismo tiempo exigentes y biológicamente realistas.

### **3.1. Neuroanatomía funcional de la atención: redes atencionales de alerta, orientación y control ejecutivo en el cerebro del niño**

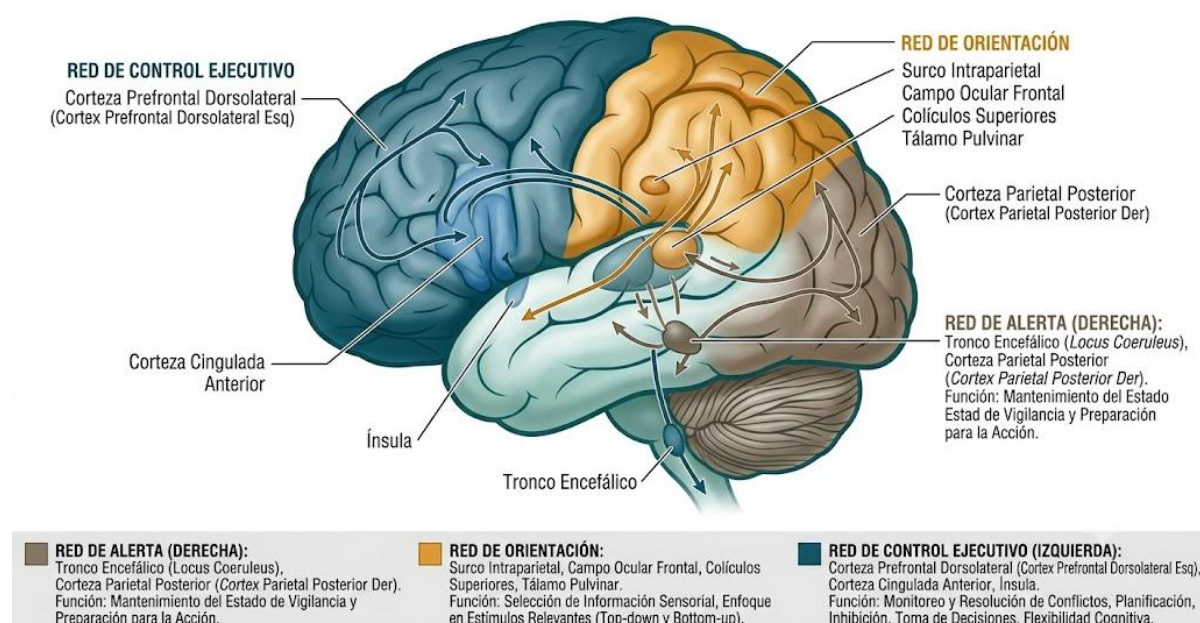
El modelo tripartito de la atención propuesto por Posner y Petersen (1990) continúa siendo, con las actualizaciones acumuladas durante más de tres décadas, el marco de referencia más productivo para comprender la neuroanatomía funcional de los procesos atencionales. Según este modelo, la atención no es una capacidad unitaria sino el producto de al menos tres redes neurales parcialmente independientes, anatómicamente diferenciables y funcionalmente especializadas: la red de alerta, que regula el estado tónico y fásico de preparación para responder a estímulos; la red de orientación, que permite dirigir los recursos atencionales hacia una localización espacial o un rasgo específico del entorno; y la red de control ejecutivo, responsable de resolver conflictos entre estímulos competidores, detectar errores y mantener el foco en la información relevante para la tarea en curso. Petersen y Posner (2012) revisaron su propio modelo incorporando evidencia de neuroimagen funcional que mostró la interacción dinámica entre estas redes, y trabajos más recientes han confirmado que la diferenciación funcional entre ellas sigue un curso madurativo que se extiende al menos hasta la adolescencia media, con cada red alcanzando la eficiencia adulta en momentos distintos del desarrollo (Rueda y Posner, 2023).

La red de alerta involucra proyecciones noradrenérgicas ascendentes desde el locus coeruleus hacia amplias regiones corticales, con particular incidencia en el hemisferio derecho y en las regiones frontoparietales que sustentan la vigilancia general. Conviene distinguir entre la alerta tónica, que refiere al nivel basal y sostenido de preparación para responder, y la alerta

fásica, que consiste en el incremento transitorio de ese nivel en respuesta a una señal de advertencia. En los niños de educación básica, la capacidad de mantener un estado de alerta tónica esa disposición general a recibir y procesar estímulos que el docente asume cuando dice "estén atentos" es significativamente menor que en los adultos y presenta una variabilidad intraindividual considerable a lo largo del día. Posner y Rothbart (2022) documentaron que la eficiencia de esta red en niños de seis a ocho años alcanza apenas el setenta por ciento de la eficiencia adulta, un dato que tiene implicaciones directas para la duración óptima de los bloques instruccionales en los primeros grados. Por el contrario, la alerta fásica la capacidad de responder a una señal que advierte sobre un estímulo inminente está relativamente conservada incluso en niños pequeños, lo cual sugiere que las señales anticipatorias que el docente utiliza antes de presentar información importante ("ahora escuchen esto con mucha atención") pueden compensar parcialmente las limitaciones en la alerta tónica.

**Figura 13**

*Redes atencionales de Posner en el cerebro infantil*



La red de orientación, sustentada principalmente por regiones parietales superiores, los campos oculares frontales y núcleos talámicos como el pulvinar, madura de forma relativamente temprana en comparación con las otras dos redes. Ya hacia los cuatro o cinco años, los niños muestran una capacidad razonablemente eficiente para redirigir la atención hacia estímulos señalizados por claves espaciales válidas. Sin embargo, la orientación endógena aquella que no responde a una señal externa sino a una decisión interna sobre qué aspecto del entorno priorizar depende parcialmente del control ejecutivo y, por tanto, sigue una

trayectoria madurativa más lenta (Amso y Scerif, 2015). Para el docente, la diferencia es reveladora: un niño de primer grado puede girar la cabeza hacia donde el maestro señala con el dedo, pero tiene dificultades sustanciales para decidir por sí mismo a qué parte de un texto complejo debe dirigir su atención cuando busca una información específica. La orientación exógena, automáticamente guiada por la saliencia del estímulo, le resulta accesible; la orientación endógena, dirigida por sus propios objetivos de búsqueda, le supone un esfuerzo cognitivo considerable que consume recursos que entonces no estarán disponibles para procesar la información una vez encontrada.

Según, Corbetta y Shulman (2002) propusieron una distinción complementaria que ha enriquecido la comprensión de la orientación atencional: la distinción entre la red atencional dorsal, responsable de la orientación voluntaria "de arriba abajo", y la red atencional ventral, que se activa cuando un estímulo inesperado captura la atención "de abajo arriba". La interacción entre ambas redes es particularmente relevante en el contexto escolar, donde el docente compite permanentemente con estímulos ambientales que capturan la red ventral del alumno: un ruido en el pasillo, el movimiento de un compañero, un objeto que cae al suelo. Investigaciones con población pediátrica han mostrado que la red ventral madura antes que la dorsal, lo cual explica la asimetría observada: los niños son capturables atencionalmente con facilidad, pero les cuesta más reorientar voluntariamente su atención de vuelta a la tarea (Hwang et al., 2022). Cada interrupción atencional no solo distrae momentáneamente, sino que genera un costo de reorientación el tiempo que tarda el sistema en retomar el foco previo que en los niños es significativamente mayor que en los adultos.

La red de control ejecutivo atencional, que recluta la corteza cingulada anterior y la corteza prefrontal lateral, es la de maduración más prolongada y la que mayor relevancia tiene para el aprendizaje escolar formal. Esta red permite al niño suprimir respuestas automáticas a estímulos distractores el ruido del pasillo, la conversación del compañero, la notificación de un dispositivo electrónico y mantener el procesamiento orientado hacia la tarea académica durante el tiempo necesario para completarla. Rueda et al. (2022) demostraron mediante registros electroencefalográficos que el componente N2, un correlato electrofisiológico del control atencional que refleja la actividad de la corteza cingulada anterior durante la resolución de conflictos, no alcanza valores adultos hasta aproximadamente los doce años, lo cual coincide con la observación pedagógica de que la capacidad para sostener la concentración en tareas complejas con múltiples fuentes de distracción mejora de forma gradual pero clara entre segundo y sexto grado. Los datos de Fan et al. (2002), obtenidos con el Attention Network Test y replicados por múltiples grupos en poblaciones pediátricas, indican que la eficiencia de la red

ejecutiva es la que más correlaciona con el rendimiento académico y la que más se beneficia del entrenamiento sistemático, aunque los efectos de transferencia de ese entrenamiento a contextos académicos siguen siendo objeto de debate.

Una distinción que la investigación reciente ha refinado con precisión creciente es la que separa la atención selectiva exógena, automáticamente capturada por estímulos salientes del entorno, de la atención selectiva endógena, voluntariamente dirigida por los objetivos del sujeto. Mientras la primera está relativamente madura desde etapas preescolares, la segunda experimenta mejoras sustanciales entre los seis y los doce años (Commodari y Di Blasi, 2022). Para la práctica docente, esta asimetría madurativa supone que un estímulo novedoso en el aula un sonido inesperado, un cambio en la iluminación, una imagen proyectada, una pregunta sorprendente capturará eficazmente la atención de los estudiantes de cualquier edad, pero la instrucción verbal que les pide mantener esa atención durante los siguientes veinte minutos exige una capacidad endógena que muchos de ellos todavía están construyendo. La novedad captura; el sostenimiento requiere esfuerzo. El docente que entiende esta dinámica puede utilizar micro-dosis de novedad distribuidas a lo largo de la sesión para reactivar la captura atencional cada vez que la atención sostenida comience a flaquear, en lugar de depender de una sola captación inicial que inevitablemente se disipará.

Los estudios de conectividad funcional realizados con resonancia magnética en poblaciones pediátricas han revelado, además, que las redes atencionales no operan de forma modular sino que están progresivamente integradas en lo que se ha denominado una "arquitectura atencional distribuida" (Gao et al., 2022). La maduración de los tractos de sustancia blanca que conectan las regiones frontoparietales con las regiones sensoriales primarias es un predictor robusto de la eficiencia atencional global, y esta mielinización progresa de forma marcadamente no lineal entre los cinco y los quince años, con períodos de aceleración y de meseta que no coinciden necesariamente con los cortes administrativos del sistema escolar. Fair et al. (2009), en un estudio ya clásico de conectividad funcional en reposo, mostraron que las redes de control atencional experimentan una reorganización topológica significativa durante la infancia media, transitando desde una organización predominantemente local hacia una integración de largo alcance entre regiones distantes. Esta reorganización coincide con los avances observados en la capacidad para coordinar múltiples fuentes de información durante tareas académicas complejas.

La convergencia de estos datos compone un cuadro coherente y lleno de consecuencias para la educación: el sistema atencional del niño de educación básica no es simplemente una versión reducida del sistema adulto, sino un sistema cualitativamente diferente, con fortalezas

específicas la captura atencional por novedad, la curiosidad exploratoria, la sensibilidad a los estímulos sociales y emocionales y limitaciones igualmente específicas la duración del foco sostenido, la resolución de conflictos atencionales, la reorientación voluntaria tras una distracción, la resistencia a la fatiga atencional. Una didáctica que ignora esta cualidad diferencial del sistema atencional infantil está, sin proponérselo, trabajando contra la biología de sus destinatarios.

### **3.2. La atención en el aula como recurso limitado: implicaciones de la carga cognitiva y la fatiga atencional para la organización de la jornada escolar**

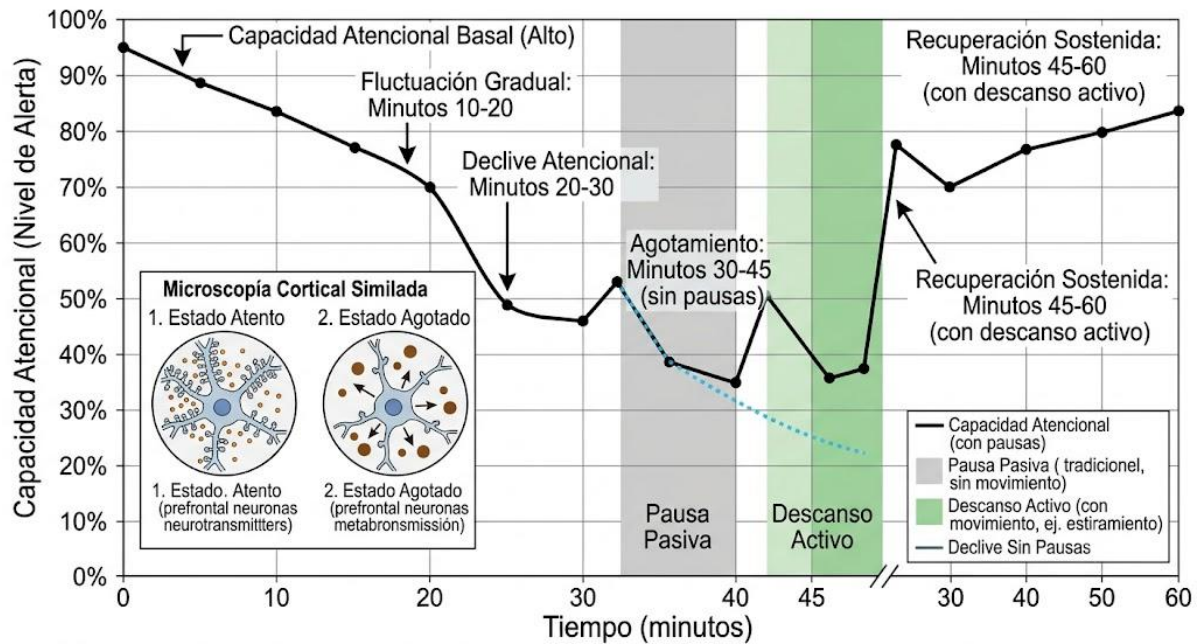
La noción de que la atención es un recurso limitado tiene raíces teóricas que se remontan a Broadbent y a los modelos de filtro de los años cincuenta, pero su operacionalización para el contexto educativo ha recibido un impulso decisivo de la teoría de la carga cognitiva formulada por Sweller (1988) y refinada en sucesivas iteraciones que incorporan hallazgos neurocientíficos. Según esta teoría, toda tarea de aprendizaje impone al menos tres tipos de carga sobre la capacidad de procesamiento del aprendiz: una carga intrínseca derivada de la complejidad inherente del material y de la interactividad entre sus elementos constitutivos; una carga extrínseca generada por el diseño instruccional que puede facilitarla o entorpecerla según la calidad de las decisiones pedagógicas; y una carga germinal asociada a los procesos de elaboración, organización y construcción de esquemas que efectivamente producen aprendizaje significativo. La revisión de Sweller et al. (2019) precisó que estas tres formas de carga compiten por los mismos recursos de la memoria de trabajo, cuya capacidad, como se detallará en la sección siguiente, es especialmente reducida en la infancia.

Lo que los estudios de neuroimagen han añadido a esta formulación teórica es una comprensión de los mecanismos cerebrales mediante los cuales se manifiesta la sobrecarga. Cuando la demanda atencional excede la capacidad de procesamiento disponible, se observa un incremento de activación en la corteza prefrontal dorsolateral que, paradójicamente, no se acompaña de un mejor rendimiento sino de una caída progresiva en la eficiencia del procesamiento (Gathercole et al., 2021). El cerebro, en estas condiciones, consume más recursos metabólicos para producir menos aprendizaje efectivo, un fenómeno que cualquier docente experimentado reconoce en la mirada perdida de los alumnos tras una explicación excesivamente larga o cargada de información nueva, o en los errores que proliferan en la segunda mitad de una tarea que al principio estaban resolviendo correctamente. Gathercole y sus colaboradores han documentado en múltiples publicaciones que los niños con menor

capacidad de memoria de trabajo son los primeros en alcanzar el punto de sobrecarga, lo cual genera una dinámica particularmente perversa: los alumnos que más necesitan aprender son los que primero pierden la capacidad de seguir procesando.

**Figura 14**

*Carga cognitiva y fatiga atencional durante la jornada*



Lavie (2023) ha propuesto un modelo revisado de la carga perceptiva que integra hallazgos con niños, mostrando que estos son más susceptibles que los adultos a la interferencia de distractores irrelevantes cuando la carga perceptiva de la tarea principal es baja, pero alcanzan niveles de filtrado comparables cuando la tarea es perceptivamente exigente. La implicación didáctica es contraintuitiva y merece ser subrayada: una tarea demasiado sencilla no necesariamente favorece la concentración, porque libera recursos atencionales que son capturados por distractores ambientales. El niño que "se distrae porque la tarea es fácil" no está siendo irrespetuoso ni desobediente; está experimentando un efecto neurocognitivo documentado según el cual los recursos atencionales no utilizados por la tarea principal quedan disponibles para procesar información irrelevante del entorno. La respuesta pedagógica adecuada no es reprender al alumno sino ajustar el nivel de demanda de la tarea para que ocupe un porcentaje mayor de su capacidad de procesamiento, un ajuste que requiere un conocimiento fino del nivel de cada alumno y una flexibilidad didáctica que los programas rígidos dificultan.

La fatiga atencional, un fenómeno que la investigación ha distinguido con creciente claridad de la simple falta de motivación o de la distracción puntual, tiene correlatos

neuroquímicos bien documentados. La depleción progresiva de dopamina y noradrenalina en los circuitos frontoparietales a medida que se prolonga una tarea cognitivamente demandante reduce la eficiencia del control atencional y aumenta la probabilidad de mind wandering, o vagabundeo mental, entendido como la irrupción de contenidos mentales no relacionados con la tarea que están en curso (Smallwood y Schooler, 2015). El vagabundeo mental no es un acto voluntario de desobediencia atencional; es un modo alternativo de funcionamiento de la red por defecto (default mode network) que se activa de forma involuntaria cuando la red de control atencional pierde su dominio funcional. Thomson et al. (2023) examinaron este fenómeno específicamente en niños de ocho a once años y documentaron que la frecuencia de episodios de vagabundeo mental aumenta de forma significativa tras períodos de instrucción continua superiores a veinte minutos, con una pendiente de deterioro más pronunciada que la observada en adultos jóvenes bajo las mismas condiciones experimentales.

Estos datos empíricos cuestionan de raíz la organización de la jornada escolar que muchos sistemas educativos mantienen por inercia institucional: bloques de cuarenta y cinco a sesenta minutos de instrucción continua, con uno o dos recreos breves durante toda la mañana. Las investigaciones de Dettmers et al. (2022) sugieren que los "descansos atencionales" pausas breves que no necesariamente implican salir del aula pero sí cambiar el tipo de demanda cognitiva podrían ser más eficaces que los recreos convencionales para restaurar la capacidad de procesamiento, especialmente cuando se distribuyen de forma estratégica a lo largo de la sesión. Un cambio de actividad que involucre modalidad sensorial diferente, movimiento corporal moderado o interacción social libre puede recargar parcialmente los recursos atencionales sin interrumpir la secuencia temática de la clase. La teoría de la restauración atencional de Kaplan (1995), originalmente formulada para explicar los efectos del contacto con la naturaleza sobre la fatiga cognitiva, ha sido adaptada al contexto escolar por investigadores que han encontrado que incluso breves exposiciones a estímulos naturales como una vista exterior con vegetación o una caminata breve por un espacio verde tienen efectos restauradores mensurables sobre la atención sostenida de los niños (Dadvand et al., 2015; Li y Sullivan, 2016).

La variabilidad interindividual en la resistencia a la fatiga atencional es otro factor que la organización escolar rara vez contempla pero que la investigación ha cuantificado con precisión. Estudios longitudinales han mostrado que la desviación estándar en tiempos de atención sostenida dentro de un mismo grupo de edad puede alcanzar hasta el cuarenta por ciento de la media grupal (Fortenbaugh et al., 2017). Dicho de otro modo, en un aula de tercer grado donde el promedio de atención sostenida es de quince minutos, habrá alumnos capaces

de mantener el foco durante veintiún minutos y otros cuya atención decaerá significativamente tras apenas nueve. Una didáctica sensible a esta heterogeneidad no puede basarse en bloques instruccionales uniformes sino que requiere segmentación flexible del tiempo, con alternancias entre momentos de instrucción directa, actividad individual pautada, trabajo colaborativo con intercambio verbal y pausas autodirigidas que permitan al sistema atencional recuperarse antes de la siguiente demanda.

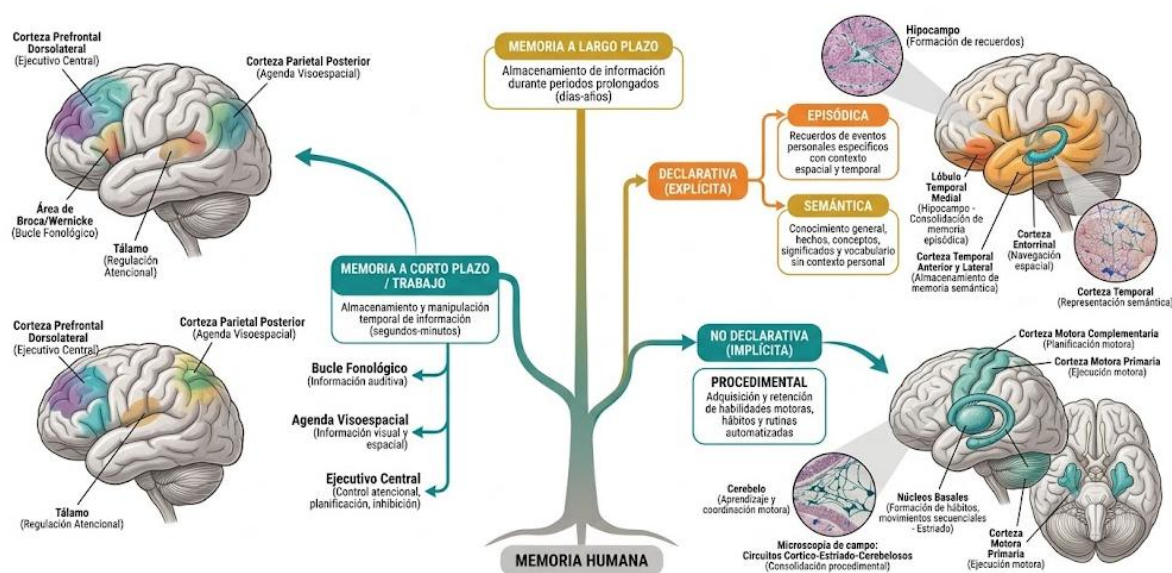
El concepto de "interferencia proactiva" aporta una capa adicional de complejidad a la gestión del tiempo escolar. Cuando un alumno estudia contenidos de una asignatura e inmediatamente después aborda contenidos de otra sin pausa significativa, la información recién codificada puede interferir con la consolidación de la anterior, un fenómeno que se intensifica cuando los contenidos comparten características superficiales pero difieren en su estructura profunda (Oberauer et al., 2022). Si un alumno acaba de trabajar con fracciones en matemáticas y pasa inmediatamente a estudiar proporciones en ciencias naturales, la similitud formal entre ambos contenidos puede generar confusiones que no se habrían producido si hubieran mediado entre ellos un intervalo temporal o una actividad cognitivamente diferente. Los datos de Gazzaley y Rosen (2016), ampliados por investigaciones recientes con poblaciones infantiles, sugieren que intercalar períodos breves de consolidación que pueden tomar la forma de actividades de repaso, escritura libre sobre lo aprendido, dibujo del concepto central, discusión entre pares, o incluso momentos de reposo sin estimulación dirigida entre bloques temáticos distintos mejora tanto la retención como la transferencia. El reposo no es tiempo perdido desde la perspectiva del aprendizaje; es tiempo ganado para la consolidación.

Un factor agravante que la investigación reciente ha puesto de relieve es el efecto de la multitarea digital sobre la atención infantil. Aunque este fenómeno afecta con mayor intensidad a los adolescentes, los niños de segundo y tercer ciclo de educación básica ya exhiben patrones de multitarea con dispositivos que fragmentan su atención de formas que la instrucción tradicional no contempla. Uncapher y Wagner (2018) mostraron que la exposición habitual a la multitarea mediática se asocia con menor eficiencia del control atencional incluso fuera del contexto digital, y estudios con niños de entre nueve y doce años han reportado correlaciones negativas entre el tiempo dedicado a la multitarea con pantallas y el rendimiento en tareas de atención sostenida en el aula (Baumgartner et al., 2023). La cuestión no se reduce a los dispositivos presentes en el aula muchas escuelas los prohíben con mayor o menor éxito sino a los hábitos atencionales que los niños están formando fuera de ella y que traen consigo cada mañana.

### 3.3. Sistemas de memoria y aprendizaje escolar: memoria de trabajo, memoria episódica, memoria semántica y memoria procedimental

**Figura 15**

*Taxonomía de los sistemas de memoria*



La memoria, lejos de constituir un almacén único en el que las experiencias se depositan como objetos en una estantería, comprende un conjunto de sistemas neurocognitivos con sustratos anatómicos diferenciados, trayectorias madurativas distintas y funciones específicas en el aprendizaje escolar. La taxonomía clásica propuesta por Squire (2004) distingue entre sistemas de memoria declarativa que incluyen la memoria episódica y la memoria semántica y sistemas de memoria no declarativa que incluyen la memoria procedimental, el priming y el condicionamiento. A estos sistemas de memoria a largo plazo se superpone la memoria de trabajo, un sistema de capacidad limitada que permite mantener y manipular información de forma transitoria para operar cognitivamente con ella en tiempo real. Cada uno de estos sistemas responde a lógicas neuronales diferentes, madura según cronogramas distintos y, por tanto, cada uno exige al docente estrategias didácticas específicas para su aprovechamiento, un punto que la formación pedagógica convencional rara vez aborda con el detalle que merece.

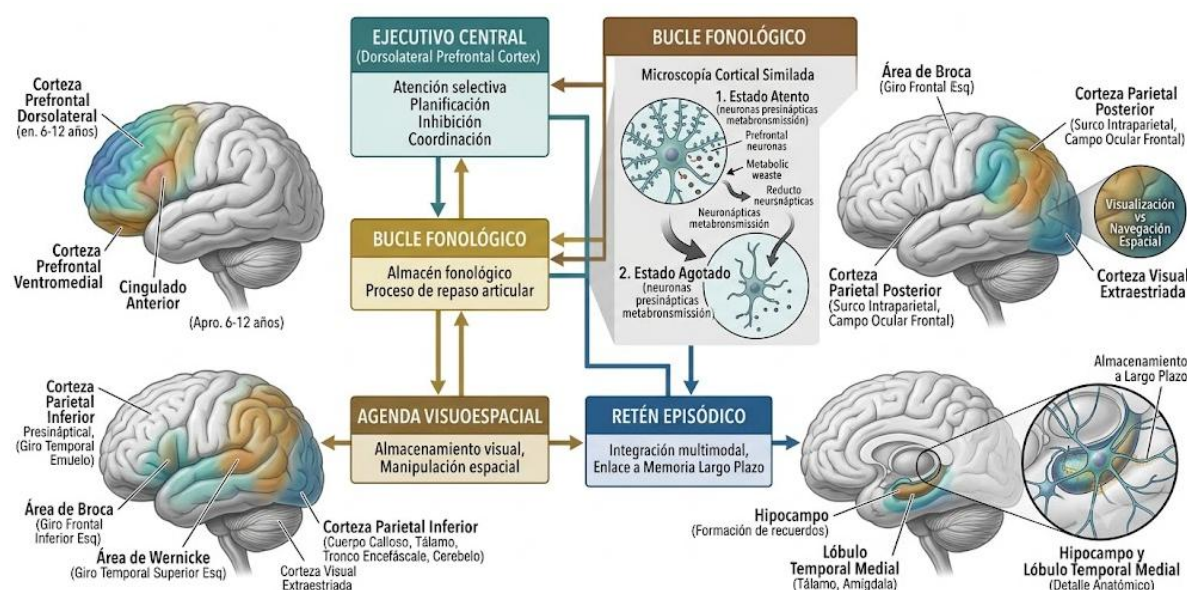
La memoria de trabajo ha recibido una atención investigativa desproporcionada en relación con los otros sistemas, y con razón: constituye el cuello de botella cognitivo que determina cuánta información nueva puede procesar un alumno en un momento dado y con qué grado de complejidad puede operar mentalmente sobre ella. El modelo multicomponente de Baddeley (2000), que postula un ejecutivo central, un bucle fonológico, una agenda

visoespacial y un buffer episódico, sigue siendo el marco teórico dominante, aunque aproximaciones alternativas como el modelo de recursos compartidos de Cowan (2022) han ganado terreno al proponer que la capacidad de la memoria de trabajo no se distribuye en módulos separados sino que refleja un límite atencional central que determina cuántos "chunks" o unidades de información pueden mantenerse activos simultáneamente. Independientemente del modelo teórico preferido, los datos convergen en un punto empírico robusto y bien replicado: la capacidad de memoria de trabajo en niños de seis años se estima entre dos y tres elementos, aumenta progresivamente hasta alcanzar cuatro o cinco elementos hacia los doce años, y no llega a valores plenamente adultos entre cinco y siete elementos según las condiciones de la tarea hasta la adolescencia tardía (Gathercole et al., 2004; Cowan, 2022).

Las implicaciones de esta limitación para la práctica escolar son profundas y a menudo subestimadas incluso por docentes experimentados. Cuando un docente dicta una instrucción compuesta de cinco pasos a un grupo de alumnos de primer grado, está operando por encima del techo de la memoria de trabajo de la mayoría de ellos. El resultado predecible y frecuentemente observado es que los alumnos retienen los dos primeros pasos, olvidan el tercero y confunden el cuarto con el quinto. Más insidiosamente, algunos alumnos abandonan el intento de seguir procesando tras percibir que han perdido el hilo, y su mirada se desconecta de la actividad sin que el docente identifique necesariamente el momento en que eso ocurrió. La solución no reside en repetir la instrucción con más énfasis la repetición duplica la carga temporal pero no reduce la complejidad instantánea, sino en segmentarla en unidades que respeten la capacidad del sistema: dar dos pasos, verificar su ejecución, luego dar los siguientes. Alloway y Alloway (2023) han documentado que la sobrecarga sistemática de la memoria de trabajo no solo produce errores inmediatos, sino que genera un efecto acumulativo de frustración y desenganche que puede consolidarse como un patrón de evitación hacia las tareas académicas demandantes. El niño que ha experimentado repetidamente la sensación de no poder seguir el ritmo de la instrucción aprende, literalmente, que esforzarse por seguirlo resulta inútil, y deja de intentarlo.

**Figura 16**

*Modelo de memoria de trabajo de Baddeley y Hitch*



El bucle fonológico, componente de la memoria de trabajo especializado en el mantenimiento transitorio de información verbal, tiene una relevancia particular para el aprendizaje de la lectoescritura y de las lenguas extranjeras. Su eficiencia depende del proceso de repaso subvocal la repetición interna de la información verbal para mantenerla activa que, según la evidencia disponible, no emerge como estrategia espontánea hasta los siete u ocho años (Gathercole, 1998). Los niños de preescolar y primer grado dependen más de la codificación fonológica pasiva que del repaso activo, lo cual explica por qué la longitud de las palabras tiene un efecto proporcionalmente mayor sobre su recuerdo que sobre el de los niños mayores: sin repaso subvocal, las huellas fonológicas se degradan por decaimiento temporal antes de que puedan ser consolidadas. Este fenómeno, conocido como "efecto de longitud de palabra", tiene una traducción didáctica directa: las instrucciones verbales dirigidas a niños del primer ciclo deberían privilegiar formulaciones breves con palabras cortas y familiares, reservando las formulaciones más extensas y el vocabulario técnico para edades en las que el repaso subvocal opera de forma más eficiente.

La agenda visoespacial, por su parte, mantiene y manipula información visual y espacial, y desempeña un papel central en el aprendizaje de la geometría, la comprensión de mapas y gráficos, la visualización de procedimientos científicos y la lectura de diagramas. A diferencia del bucle fonológico, cuyo funcionamiento ha sido extensamente estudiado, la agenda visoespacial cuenta con menos investigación en poblaciones infantiles, aunque los

estudios disponibles sugieren que su capacidad también se incrementa con la edad y que existe una disociación parcial entre el componente visual estático (memoria de patrones y formas) y el componente espacial dinámico (memoria de secuencias de localizaciones y trayectorias de movimiento) que madura a ritmos diferentes (Logie y Cowan, 2015).

La memoria episódica, dependiente del hipocampo y las cortezas adyacentes del lóbulo temporal medial, permite la codificación y recuperación de eventos situados en un contexto espacio-temporal específico: el niño recuerda que ayer la profesora contó una historia sobre los dinosaurios, que estaba sentado junto a la ventana cuando eso ocurrió, que llovía fuera y que el compañero de al lado estornudó justo cuando ella describía al tiranosaurio. Este tipo de memoria tiene una enorme relevancia educativa porque constituye la puerta de entrada primaria a través de la cual las experiencias didácticas se inscriben en el cerebro del niño; el aprendizaje escolar comienza casi siempre como un episodio recordado antes de convertirse en conocimiento abstracto (Ghetti y Fandakova, 2020). Las investigaciones con resonancia magnética funcional han mostrado que las subregiones hipocampales maduran de forma diferencial: el subículo alcanza volúmenes relativamente estables hacia los ocho años, pero el giro dentado y la región CA3 continúan su desarrollo estructural hasta bien entrada la adolescencia (Canada et al., 2023). Esta heterogeneidad madurativa intrahipocampal explica por qué los niños pequeños pueden formar recuerdos episódicos vívidos recuerdan la historia del dinosaurio con detalle pero a menudo carecen de la capacidad para contextualizarlos con precisión temporal o para distinguir entre eventos similares ocurridos en ocasiones distintas confunden cuándo ocurrió cada episodio o mezclan elementos de varios.

La capacidad para vincular un contenido aprendido con el contexto específico en que fue aprendido lo que la investigación denomina "binding relacional" depende de la maduración del hipocampo y muestra mejoras significativas entre los seis y los doce años (Lee et al., 2020). Esta capacidad es particularmente relevante para el aprendizaje escolar porque muchos errores que los docentes atribuyen a falta de estudio o de atención son en realidad fallos de binding: el niño recuerda datos aislados, pero no las relaciones entre ellos, o recuerda un procedimiento pero no las condiciones en que debe aplicarlo. La diferencia entre un alumno que sabe que la fotosíntesis "usa luz" y uno que comprende la relación causal entre la luz solar, la clorofila y la producción de glucosa es, en parte, una diferencia en la eficiencia de su binding relacional hipocampal.

La memoria semántica, que almacena conocimiento general descontextualizado el niño sabe que los dinosaurios se extinguieron hace sesenta y cinco millones de años, independientemente de cuándo o dónde aprendió ese dato, se construye progresivamente a

partir de la consolidación y abstracción de memorias episódicas. La transición de memoria episódica a memoria semántica, que los modelos teóricos sitúan en un proceso de "semantización" gradual mediado por la corteza temporal anterior y regiones prefrontales (Gilboa y Marlatte, 2017), requiere múltiples reexposiciones al material en contextos variados. Un dato aprendido en una única lección permanece típicamente como memoria episódica el niño recuerda la clase, no el contenido abstracto. Solo cuando ese dato se reencuentra en situaciones diversas, se relaciona con otros conocimientos, se utiliza para resolver problemas diferentes, se produce la descontextualización que lo convierte en conocimiento semántico genuino, transferible a situaciones nuevas. La implicación pedagógica es que la verdadera comprensión de un concepto no puede lograrse en una sola sesión de enseñanza, por brillante que sea, sino que requiere un proceso distribuido de reexposición, elaboración y aplicación variada que el diseño curricular debería contemplar de forma explícita.

La memoria procedimental, sustentada por los ganglios basales, el cerebelo y las cortezas motoras, opera según lógicas radicalmente diferentes de las que gobiernan la memoria declarativa. Su adquisición requiere práctica repetida, su mejora es gradual y a menudo no consciente, y su expresión es típicamente implícita: el niño que ha automatizado la decodificación lectora no necesita pensar conscientemente en la correspondencia grafema-fonema para leer una palabra familiar, del mismo modo que el niño que ha automatizado las tablas de multiplicar no necesita recurrir a la suma iterativa para responder que seis por ocho son cuarenta y ocho. La automatización procedimental tiene un valor estratégico que trasciende la mera eficiencia: libera recursos de la memoria de trabajo que quedan disponibles para procesos de orden superior comprensión lectora, resolución de problemas, razonamiento crítico, una relación documentada extensamente por la teoría de la automaticidad (Logan, 2002) y confirmada por estudios recientes con población infantil escolarizada (Klingberg, 2023). El docente que dedica tiempo suficiente a la práctica de habilidades básicas hasta su automatización no está incurriendo en un ejercicio conductista anacróstico, como a veces se le acusa desde perspectivas pedagógicas que privilegian la comprensión sobre la práctica; está invirtiendo en la liberación de recursos cognitivos que permitirán a sus alumnos abordar tareas intelectualmente más complejas con la capacidad de procesamiento necesaria para resolverlas.

La interacción entre estos sistemas de memoria durante el aprendizaje escolar es más compleja de lo que los tratamientos pedagógicos habituales sugieren. Cuando un alumno resuelve un problema de matemáticas, está utilizando simultáneamente su memoria de trabajo para mantener los datos del problema y las operaciones intermedias, su memoria procedimental para ejecutar los algoritmos aritméticos automatizados, su memoria semántica para acceder a

los conceptos y reglas relevantes, y posiblemente su memoria episódica para recordar un problema similar resuelto previamente. El fallo en cualquiera de estos sistemas puede producir un error, pero el tipo de error será cualitativamente diferente según cuál sea el sistema comprometido. El docente que aprende a leer los errores de sus alumnos como indicadores diagnósticos del sistema de memoria afectado puede ofrecer una retroalimentación mucho más precisa y útil que el docente que simplemente marca el error y solicita corrección.

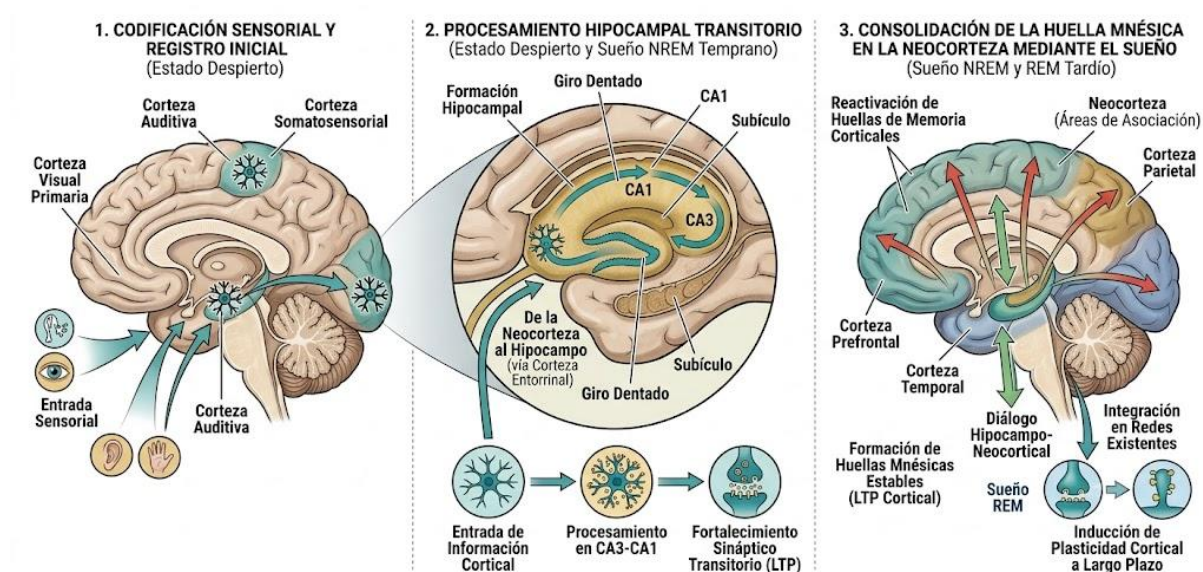
### **3.4. De la codificación a la consolidación y la recuperación: cómo el cerebro transforma la experiencia didáctica en conocimiento duradero**

Comprender los sistemas de memoria es condición necesaria pero insuficiente para diseñar una enseñanza eficaz; el docente necesita además entender los procesos mediante los cuales la información transita de un estado inicial frágil a una representación duradera y accesible. Estos procesos de codificación, consolidación y recuperación constituyen la cadena operativa del aprendizaje, y la ruptura en cualquiera de sus eslabones impide que una experiencia didáctica se transforme en conocimiento funcional, independientemente de cuán bien diseñada haya estado la experiencia misma.

La codificación, primer eslabón, refiere al conjunto de operaciones mediante las cuales el cerebro transforma un estímulo externo en una representación neural interna. Craik y Lockhart (1972) propusieron hace más de cinco décadas que la profundidad del procesamiento durante la codificación determina la probabilidad de retención posterior, una idea que la investigación contemporánea ha confirmado y enriquecido sustancialmente con evidencia neurofisiológica. Los estudios con electroencefalografía y potenciales evocados han mostrado que los patrones de actividad theta en el hipocampo durante la codificación predicen la retención posterior con una fiabilidad superior al azar, y que la sincronización theta entre el hipocampo y la corteza prefrontal es particularmente marcada durante la codificación de material que será exitosamente recordado días después (Herweg et al., 2020).

**Figura 17**

*Fases del procesamiento de la memoria (Codificación a Recuperación)*



Para el contexto educativo, la traducción de este principio es directa, aunque rara vez se aplica con rigor: la información que el alumno procesa de forma superficial leyendo pasivamente un texto, escuchando una exposición sin elaborar mentalmente, copiando mecánicamente del pizarrón genera patrones de codificación débiles que producen huellas mnémicas frágiles, susceptibles al olvido rápido. Por el contrario, la información procesada en profundidad relacionándola con conocimientos previos, generando ejemplos propios, explicándola a un compañero, transformándola a un formato diferente, formulando preguntas sobre ella activa patrones de codificación robustos que facilitan tanto la retención como la recuperación posterior.

El principio de la especificidad de codificación, formulado por Tulving y Thomson (1973), añade un matiz de gran importancia práctica: la probabilidad de recuperar con éxito una información aumenta cuando las condiciones de recuperación coinciden con las condiciones de codificación. Si un alumno aprendió un concepto en un contexto particular asociado a ciertos ejemplos, presentado con determinado vocabulario, vinculado a una actividad específica, lo recuperará más fácilmente en condiciones que reproduzcan ese contexto. La implicación para la evaluación escolar es considerable: un examen que utiliza un formato, vocabulario o tipo de ejemplos radicalmente diferentes de los usados durante la instrucción puede subestimar lo que el alumno realmente sabe, porque las claves de recuperación disponibles durante el examen no coinciden con las que se asociaron a la huella mnémica durante la codificación. La solución no es hacer los exámenes idénticos a las clases

lo cual anularía la transferencia, sino codificar el material en múltiples contextos y formatos desde el principio, de modo que la huella mnémica quede asociada a un abanico amplio de claves de recuperación que la hagan accesible en situaciones variadas.

El principio de la codificación elaborativa tiene un correlato didáctico que Dunlosky et al. (2013) sistematizaron en su influyente revisión de estrategias de estudio, y que estudios posteriores han validado con poblaciones de educación básica (Fiorella y Mayer, 2021). La generación de explicaciones propias, la elaboración interrogativa formularse preguntas sobre el material del tipo "¿por qué es así?" o "¿qué pasaría si fuera diferente?", y la práctica de recuperación intentar recordar sin consultar la fuente son las tres estrategias con mayor respaldo empírico para fortalecer la codificación y promover la retención duradera. Cada una de ellas involucra redes neurales parcialmente diferentes: la generación activa el circuito prefrontal-hipocampal en mayor medida que la recepción pasiva; la elaboración interrogativa recluta redes de procesamiento semántico que profundizan la integración del nuevo material con el conocimiento previo; la práctica de recuperación fortalece las rutas de acceso a la huella mnémica, no solo la huella misma (Karpicke, 2012). El denominador común de las tres es que exigen al aprendiz un esfuerzo cognitivo activo que contrasta con la pasividad receptiva que caracteriza la instrucción expositiva prolongada.

La consolidación, segundo eslabón, es el proceso mediante el cual las huellas mnémicas se estabilizan y reorganizan progresivamente, transitando desde una dependencia inicial del hipocampo hacia una representación más distribuida en las cortezas neocorticales. La teoría estándar de la consolidación sistémica (Frankland y Bontempi, 2005) postula que esta reorganización se produce durante períodos prolongados días, semanas, meses y que el sueño cumple un papel privilegiado en ella. Durante el sueño de ondas lentas, las neuronas hipocampales "replayan" los patrones de actividad registrados durante la vigilia, y esta reactivación fortalece las conexiones sinápticas que sustentan la memoria, facilitando su gradual independización del hipocampo (Diekelmann y Born, 2010). La revisión de la teoría complementaria de la consolidación propuesta por McClelland et al. (1995) añade que este proceso gradual es necesario porque la integración abrupta de información nueva en las redes neocorticales produciría interferencia catastrófica con el conocimiento previamente almacenado; la consolidación lenta permite que los nuevos aprendizajes se intercalen con los existentes sin destruirlos.

Estudios con niños en edad escolar han confirmado que la calidad del sueño nocturno predice el rendimiento en tareas de memoria declarativa al día siguiente, y que esta relación es más fuerte para la información codificada de forma deliberada que para la información

codificada incidentalmente (Wilhelm et al., 2021). La siesta diurna puede tener efectos consolidadores significativos en niños de preescolar y primeros grados: Giganti et al. (2014) encontraron que los niños de cinco y seis años que dormían una siesta tras una sesión de aprendizaje mostraban mejor retención que los que permanecían despiertos durante el mismo intervalo, aunque este efecto se reducía con la edad a medida que los niños abandonaban espontáneamente el hábito de la siesta. La conexión entre sueño y consolidación será examinada con mayor profundidad en el capítulo 6, pero conviene adelantar aquí que la evidencia disponible cuestiona prácticas escolares que comprimen la jornada matutina con contenidos densos y reservan las tardes para actividades consideradas menos académicas: dado que el sueño nocturno consolida preferentemente lo aprendido en las horas previas a acostarse, la distribución temporal de los contenidos a lo largo del día no es pedagógicamente neutral.

La implicación más provocadora de la investigación sobre consolidación para la práctica docente es temporal: el aprendizaje no termina cuando la clase termina. El período posterior a la exposición al material es tan relevante para la formación de la memoria duradera como la exposición misma. Un alumno que recibe una clase sobre fracciones y luego dedica el resto de la mañana a actividades de alta demanda cognitiva en asignaturas no relacionadas podría consolidar menos que uno que dispone de un breve período de reposo o de actividad física moderada tras la clase de matemáticas. Dewar et al. (2012) demostraron en adultos que el reposo despierto sentarse en silencio sin estimulación externa durante diez minutos tras la codificación mejora la retención a una semana, y Martini et al. (2022) replicaron este hallazgo con niños de nueve y diez años, encontrando que diez minutos de reposo tranquilo tras una sesión de aprendizaje aumentaban la retención en un veinte por ciento respecto a una condición de interferencia activa. La implicación organizativa es clara: los "tiempos muertos" entre clases, lejos de ser tiempo desperdiciado, pueden ser oportunidades de consolidación que el diseño de la jornada debería proteger en lugar de eliminar por eficiencia administrativa.

La recuperación, tercer eslabón, ha pasado de ser considerada un mero indicador del aprendizaje un termómetro que mide pero no modifica la temperatura a ser reconocida como un potente agente de aprendizaje en sí misma. El "efecto de testing" o "efecto de la práctica de recuperación", descrito ya por trabajos clásicos pero articulado con rigor experimental por Roediger y Karpicke (2006), muestra que intentar recuperar información de la memoria produce un aprendizaje más duradero que reestudiar el mismo material durante un tiempo equivalente. Este hallazgo es contraintuitivo tanto para los alumnos, que perciben el reestudio como más placentero y eficaz que la autoexaminación, como para algunos docentes, que consideran que los cuestionarios son herramientas de evaluación y no de aprendizaje. Los

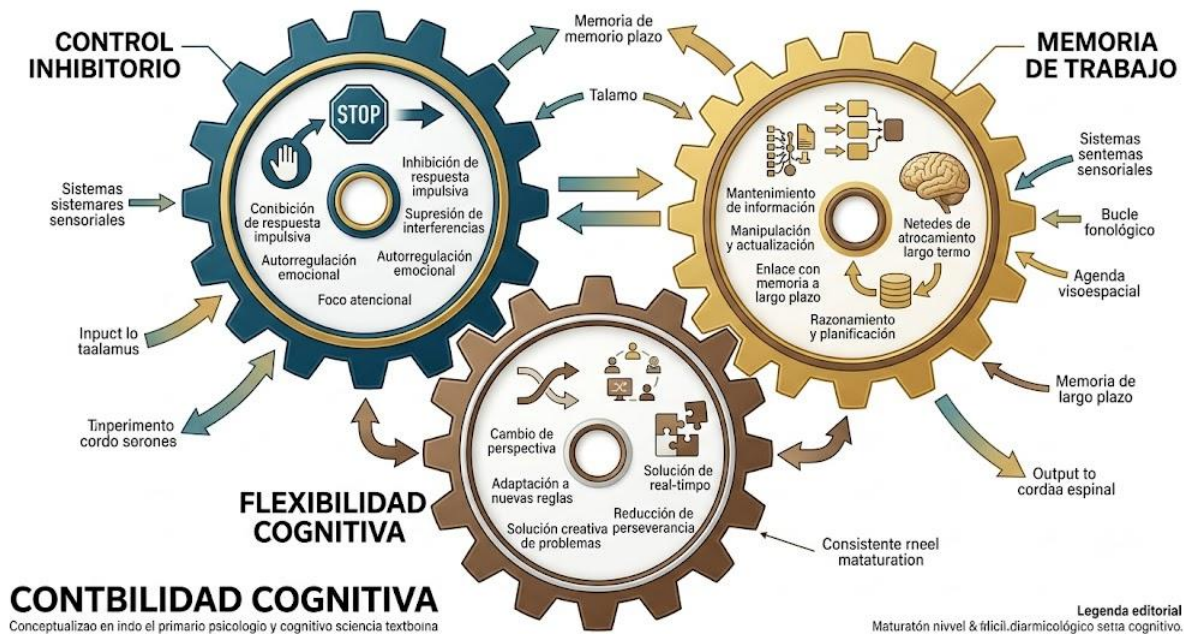
mecanismos neurales de este efecto implican un fortalecimiento de las rutas de acceso hipocampo-neocorticales durante cada acto de recuperación exitoso, y también una señal de error cuando la recuperación falla que desencadena procesos de recodificación más elaborada (Karpicke y Blunt, 2011). Pan et al. (2023) examinaron la efectividad de la práctica de recuperación en niños de tercer a sexto grado y confirmaron que incluso con materiales curriculares reales no estímulos artificiales de laboratorio la recuperación repetida y espaciada producía retención superior a la relectura, la elaboración de resúmenes e incluso la generación de mapas conceptuales.

El espaciamiento temporal entre las sesiones de práctica es otro factor con respaldo neurocientífico sólido y con una base empírica que abarca más de un siglo de investigación, desde los trabajos pioneros de Ebbinghaus. El "efecto de espaciamiento" la ventaja de distribuir la práctica en el tiempo frente a concentrarla en una sola sesión ha sido replicado en cientos de estudios con poblaciones diversas, materiales variados y condiciones experimentales diferentes (Carpenter et al., 2022). La explicación neurocognitiva predominante sugiere que cada nueva sesión de práctica espaciada reactiva la huella mnémica en un contexto parcialmente diferente diferente estado emocional, diferente momento del día, diferente proximidad temporal a otros aprendizajes, lo cual enriquece las claves de recuperación asociadas a esa huella y facilita su acceso posterior desde contextos variados. Traducido al aula, este principio cuestiona la práctica habitual de enseñar un tema en una unidad compacta de una o dos semanas y no volver sobre él hasta el examen final: una distribución estratégica de repasos breves a lo largo de semanas y meses produce un aprendizaje más resistente al olvido que la concentración temática seguida de abandono. El efecto de "intercalación" alternar entre diferentes tipos de problemas o temas dentro de una misma sesión de práctica complementa al espaciamiento al forzar al alumno a discriminar entre categorías y seleccionar la estrategia apropiada para cada problema, un proceso que fortalece tanto la recuperación como la flexibilidad cognitiva (Rohrer, 2012).

### 3.5. Funciones ejecutivas en desarrollo: inhibición, flexibilidad cognitiva y planificación como predictores del éxito académico y social

**Figura 18**

*Componentes de las Funciones Ejecutivas*



Las funciones ejecutivas constituyen, posiblemente, el constructo neurocognitivo de mayor poder predictivo para el rendimiento académico durante la educación básica, un poder que en muchos estudios iguala o supera al del cociente intelectual medido por pruebas convencionales. Diamond (2013), en su revisión canónica, definió tres funciones ejecutivas nucleares inhibición, flexibilidad cognitiva y memoria de trabajo (esta última ya abordada en el apartado anterior como sistema de memoria) y argumentó que de su interacción emergen funciones ejecutivas de orden superior como la planificación, el razonamiento y la resolución de problemas. Los estudios longitudinales realizados en las dos décadas posteriores han confirmado de forma robusta que el nivel de funcionamiento ejecutivo al ingreso escolar predice el rendimiento en lectura y matemáticas no solo de forma concurrente sino también prospectiva, con efectos que se mantienen incluso cuando se controlan variables como el nivel socioeconómico y las habilidades verbales previas (Blair y Razza, 2007; Morgan et al., 2019).

La inhibición, comprendida como la capacidad para suprimir respuestas prepotentes o automáticas que son inapropiadas para el contexto, depende críticamente de la corteza prefrontal ventrolateral derecha y de la corteza cingulada anterior. Conviene distinguir, como

ha hecho la literatura reciente, entre al menos tres formas de inhibición que, aunque comparten sustratos neurales parciales, son parcialmente dissociables: la inhibición de respuesta motora (frenar una acción ya iniciada o prevenir su iniciación), la inhibición de interferencia cognitiva (suprimir el procesamiento de información irrelevante que compite con la relevante), y el control de interferencia proactiva (evitar que representaciones previamente activas en la memoria de trabajo interfieran con las actualmente relevantes) (Friedman y Miyake, 2017). En el aula, la inhibición se manifiesta cada vez que un niño debe levantar la mano en lugar de responder en voz alta, esperar su turno en una actividad grupal, resistir la tentación de mirar el trabajo del compañero durante una evaluación, continuar con una tarea tediosa cuando preferiría jugar, o suprimir una interpretación errónea de un problema para considerar una alternativa. Los estudios con paradigmas go/no-go y Stroop adaptados para niños muestran que la eficiencia inhibitoria mejora de forma acelerada entre los tres y los seis años y continúa perfeccionándose de manera más gradual hasta los quince (Brocki y Bohlin, 2004; Zelazo, 2023).

Un dato que los docentes de primer ciclo deberían tener presente es que la variabilidad intraindividual en la capacidad inhibitoria es decir, la fluctuación en el rendimiento del mismo niño entre un momento y otro es mayor que la variabilidad interindividual a edades tempranas (Willoughby et al., 2022). Esto significa que un mismo alumno puede inhibir correctamente una respuesta impulsiva en la primera hora de clase y fracasar en la misma tarea tras el almuerzo, sin que ello refleje necesariamente un problema de conducta sino las fluctuaciones normales de un sistema inhibitorio aún inestable. La fatiga, el hambre, el estado emocional, la acumulación de demandas inhibitorias previas y la hora del día modulan la eficiencia inhibitoria de formas que el adulto suele controlar mejor que el niño, simplemente porque su sistema inhibitorio tiene mayor capacidad de reserva. Los estudios de Hagger et al. (2010) sobre "depleción del ego" la idea de que el autocontrol es un recurso que se agota con el uso han sido objeto de debate y revisión crítica, pero la evidencia específica con niños sugiere que la acumulación de demandas inhibitorias a lo largo de la jornada escolar sí produce un deterioro medible en la capacidad de autorregulación, especialmente en niños con niveles basales más bajos de control inhibitorio (Dai y Sternberg, 2021).

La flexibilidad cognitiva la capacidad para alternar entre diferentes reglas, perspectivas o estrategias en función de las demandas cambiantes del entorno recluta una red que incluye la corteza prefrontal dorsolateral, las cortezas parietales y regiones de los ganglios basales implicadas en la actualización de las representaciones mantenidas en la memoria de trabajo. En el contexto escolar, la flexibilidad cognitiva se activa cuando el alumno debe cambiar de

estrategia porque la que estaba usando no funciona, cuando transita de una asignatura a otra con reglas y convenciones diferentes, cuando debe considerar un problema desde perspectivas múltiples, o cuando una tarea requiere alternar entre operaciones cognitivas distintas dentro de una misma actividad, por ejemplo, leer un enunciado, extraer datos, seleccionar una operación y verificar el resultado. Aunque algunos estudios la han considerado subsidiaria de la inhibición para cambiar de enfoque hay que inhibir el enfoque anterior, la evidencia neuropsicológica y de neuroimagen indica que ambos procesos, pese a compartir sustratos parciales, son disociables funcionalmente (Miyake y Friedman, 2012). Dajani y Uddin (2015) mostraron que la corteza prefrontal medial y la ínsula anterior contribuyen específicamente a la flexibilidad cognitiva de un modo que no se reduce a la inhibición pura, y que los perfiles de conectividad funcional asociados a la flexibilidad son parcialmente independientes de los asociados a la inhibición.

La rigidez cognitiva, polo opuesto de la flexibilidad, se manifiesta en el aula como perseveración: el niño que sigue aplicando la misma estrategia aunque ya no funcione, que no puede abandonar una interpretación errónea incluso cuando se le muestra evidencia en contra, o que experimenta gran dificultad para adaptarse a cambios en las rutinas o en los formatos de las actividades. Esta rigidez no es obstinación voluntaria sino una limitación genuina del sistema ejecutivo cuya superación requiere maduración neural y práctica sostenida en contextos que demanden alternancia (Diamond, 2013). Los docentes que interpretan la perseveración como desafío o desinterés pierden la oportunidad de proporcionar el andamiaje específico que el niño necesita para desarrollar flexibilidad: la modelación explícita de estrategias alternativas, la validación del esfuerzo de cambio independientemente del resultado inmediato, y la exposición gradual a situaciones que requieren desplazamiento entre marcos de referencia diferentes.

La planificación, función ejecutiva de orden superior que requiere la coordinación de inhibición, flexibilidad y memoria de trabajo en una secuencia temporal orientada a una meta, tiene una trayectoria madurativa particularmente prolongada. Evaluada mediante tareas como la Torre de Londres o la Torre de Hanoi, la capacidad de planificación muestra mejoras continuas desde los seis hasta los quince años, con aceleraciones notables entre los ocho y los diez años que coinciden con cambios estructurales documentados en la corteza prefrontal rostrolateral (Luciana et al., 2005; Andrews-Hanna et al., 2021). En el aula, la planificación se pone a prueba cada vez que un alumno debe organizar un proyecto a largo plazo, distribuir su tiempo durante un examen con múltiples secciones, decidir el orden en que resolverá los pasos de un problema complejo, o preparar un texto escrito que requiere decidir qué contenido incluir,

en qué orden presentarlo y cómo organizarlo para que resulte comprensible. Los estudios de Best y Miller (2010), revisados y actualizados por trabajos recientes (Moriguchi y Zelazo, 2023), han documentado que la planificación depende no solo de la maduración prefrontal sino de la experiencia acumulada en situaciones que demandan secuenciación de acciones orientadas a metas, lo cual confiere al entorno escolar un potencial formativo considerable: cada actividad que requiere planificación constituye, si está bien diseñada, un ejercicio de desarrollo ejecutivo.

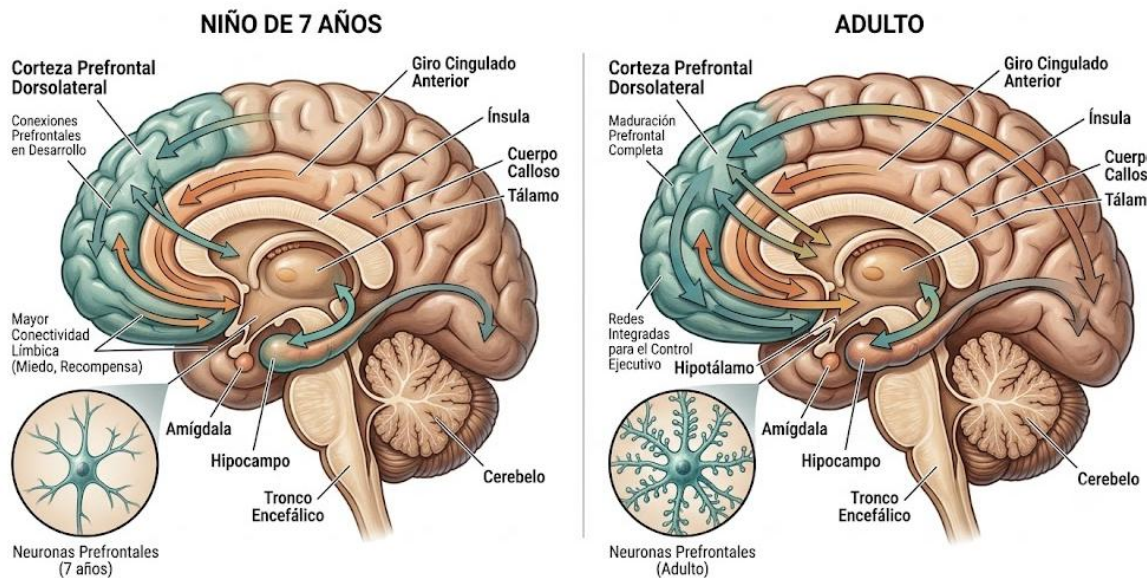
La relación entre funciones ejecutivas y rendimiento académico no es unidireccional sino recíproca, un punto que la investigación ha ido clarificando progresivamente. Si bien el funcionamiento ejecutivo predice el aprendizaje escolar, también existe evidencia creciente de que ciertas actividades académicas particularmente las que implican autorregulación, resolución de problemas abiertos y trabajo colaborativo con negociación de perspectivas promueven el desarrollo ejecutivo (Blair, 2016). Jacob y Parkinson (2015) revisaron intervenciones diseñadas para fortalecer funciones ejecutivas en contextos escolares y concluyeron que las más efectivas no eran los programas de entrenamiento cognitivo computarizado, cuyos efectos de transferencia han resultado decepcionantes cuando se evalúan con rigor, sino las actividades curriculares que demandan control ejecutivo de forma integrada en tareas académicas significativas. Aprender a planificar un texto escrito, a verificar una operación matemática paso a paso, a arbitrar un desacuerdo en un trabajo grupal, o a monitorear la propia comprensión durante la lectura son situaciones que simultáneamente requieren y ejercitan funciones ejecutivas, creando un círculo virtuoso entre desarrollo cognitivo y aprendizaje disciplinar que el diseño curricular debería aprovechar de forma deliberada.

Las funciones ejecutivas no solo predicen el rendimiento académico sino también la competencia social y la adaptación conductual en el contexto escolar. Los niños con mejor control inhibitorio manejan con más eficacia los conflictos interpersonales, los que exhiben mayor flexibilidad cognitiva se adaptan mejor a los cambios en las dinámicas grupales, y los que planifican con más eficiencia gestionan mejor la distribución de tareas en trabajos colaborativos (Riggs et al., 2006). Esta convergencia entre lo académico y lo social refuerza la idea de que las funciones ejecutivas no son competencias exclusivamente cognitivas sino que se proyectan sobre todo el espectro de la conducta adaptativa del niño en la escuela, un argumento que debería motivar a los sistemas educativos a tratar su fortalecimiento no como un complemento opcional sino como un objetivo formativo central.

### 3.6. La corteza prefrontal como última frontera madurativa: por qué los niños de educación básica no aprenden como los adultos

**Figura 19**

*Inmadurez de la corteza prefrontal y autorregulación*



La corteza prefrontal ocupa aproximadamente el treinta por ciento de la superficie cortical en los seres humanos una proporción significativamente mayor que la de cualquier otro primate y constituye la sede neural de los procesos cognitivos que más distinguen al pensamiento humano maduro: la anticipación de consecuencias, el razonamiento abstracto, la regulación del comportamiento en función de normas sociales, la toma de decisiones basada en metas a largo plazo, la generación y evaluación de hipótesis, y la capacidad de reflexionar sobre los propios procesos mentales. Pero esta región, cuya complejidad funcional es inigualada en el cerebro, es también la de maduración más tardía en la ontogenia cerebral humana, y esta lentitud madurativa no es un accidente biológico sino una característica adaptativa que permite una prolongada ventana de sensibilidad experiencial.

Los estudios longitudinales de neuroimagen estructural, entre los que destaca el trabajo seminal del equipo de Giedd en el National Institute of Mental Health, mostraron que el volumen de materia gris prefrontal sigue una curva de U invertida que alcanza su pico entre los once y los doce años en la corteza prefrontal dorsolateral, para luego iniciar un proceso de poda sináptica y refinamiento que se extiende hasta la tercera década de vida (Giedd et al., 1999; Mills et al., 2021). La poda sináptica, lejos de representar una pérdida, constituye un mecanismo de especialización: las sinapsis más utilizadas se fortalecen mientras que las menos

utilizadas se eliminan, lo cual incrementa la eficiencia del procesamiento a costa de reducir la flexibilidad estructural. El cerebro del niño de educación básica, con su exceso relativo de sinapsis, es un sistema más flexible pero menos eficiente que el cerebro adulto, un equilibrio que tiene implicaciones directas para el tipo de aprendizaje que favorece: exploración amplia, sensibilidad a múltiples estímulos, apertura a la novedad.

La mielinización de los tractos que conectan la corteza prefrontal con otras regiones cerebrales sigue una trayectoria aún más prolongada que la maduración de la materia gris. El fascículo longitudinal superior, que vincula las cortezas prefrontales con las parietales y temporales, y el fascículo uncinado, que conecta la corteza orbitofrontal con las estructuras del lóbulo temporal medial implicadas en la memoria y la emoción, no alcanzan niveles de mielinización adultos hasta bien entrada la segunda década de vida (Lebel y Deoni, 2018). La mielina, al aumentar la velocidad de conducción nerviosa, no solo acelera el procesamiento sino que facilita la sincronización temporal entre regiones distantes, un requisito indispensable para las operaciones cognitivas complejas que exigen la coordinación simultánea de múltiples procesos. La investigación de Simmonds et al. (2014) mostró que la maduración de las conexiones prefrontales-estriatales correlaciona con mejoras en la velocidad de respuesta inhibitoria, un hallazgo que ilustra cómo la conectividad estructural sustenta directamente la eficiencia funcional.

Esta información biológica tiene una implicación directa y profunda para la educación que merece ser articulada con claridad: el hardware neural que permite la planificación a largo plazo, la inhibición consistente de impulsos, la evaluación ponderada de riesgos, el razonamiento hipotético-deductivo y la metacognición está literalmente en construcción durante toda la etapa de educación básica. Los docentes que esperan de sus alumnos de ocho años las mismas capacidades de autorregulación, organización temporal, pensamiento abstracto y persistencia en la tarea que observan en los adultos o en sí mismos están demandando operaciones cognitivas para las cuales el sustrato neural aún no está plenamente disponible. Esto no constituye una excusa para la permisividad sino una llamada a la calibración: exigir lo que es biológicamente posible, acompañar lo que es posible pero difícil, y no castigar lo que es todavía imposible.

Zelazo (2023) ha propuesto el concepto de "jerarquía de reglas" para describir cómo la complejidad de las representaciones que la corteza prefrontal puede manejar aumenta progresivamente con la edad y con la experiencia. Un niño de cuatro años puede seguir una regla simple ("pon los rojos aquí y los azules allá"), pero fracasa cuando debe integrar dos dimensiones simultáneamente. Un niño de siete años maneja dos dimensiones, pero tiene

dificultades con reglas condicionales complejas ("si es grande y rojo, ponlo aquí; si es pequeño y azul, ponlo allá; si es grande y azul, decide tú según la forma"). Un niño de once años puede manejar reglas condicionales de segundo orden, pero se ve desafiado cuando debe formular las reglas por sí mismo a partir de la observación de regularidades. La capacidad para operar con reglas de complejidad creciente correlaciona con la maduración de las capas granulares de la corteza prefrontal dorsolateral, que siguen un cronograma de desarrollo determinado parcialmente por la genética, pero también modulado significativamente por la calidad y cantidad de las experiencias cognitivamente demandantes (Bunge y Zelazo, 2006).

La metacognición la capacidad de pensar sobre el propio pensamiento, de monitorear los procesos cognitivos propios y de ajustar las estrategias cuando no funcionan constituye quizá la función prefrontal más relevante para el aprendizaje autónomo y, simultáneamente, la de aparición más tardía y de desarrollo más lento. Los estudios de Roebers (2017), actualizados por trabajos recientes con medidas neurofisiológicas (Roebers y Spiess, 2022), muestran que la capacidad de monitoreo metacognitivo experimenta un salto cualitativo entre los ocho y los diez años, pero no alcanza niveles funcionales consistentes hasta la adolescencia. Los niños menores de ocho años tienden a sobreestimar su propio conocimiento y rendimiento de forma sistemática fenómeno denominado "ilusión de competencia", lo cual dificulta que identifiquen por sí mismos qué necesitan repasar, qué estrategia de estudio les conviene utilizar, o incluso si han comprendido realmente lo que les fue explicado. El docente, al conocer esta limitación madurativa, puede compensarla proporcionando retroalimentación metacognitiva explícita: no solo corregir el error, sino señalar qué tipo de error fue, por qué probablemente ocurrió y qué podría hacer el alumno para evitarlo la próxima vez. Este tipo de retroalimentación funciona como un modelo externo de los procesos metacognitivos que el niño irá internalizando progresivamente hasta poder ejecutarlos de forma autónoma.

La toma de decisiones en condiciones de incertidumbre, otra función prefrontal por excelencia, presenta particularidades en la infancia que afectan directamente a la conducta académica y social. Mientras los adultos con corteza prefrontal madura pueden ponderar consecuencias a mediano y largo plazo, sopesando probabilidades y costos diferidos, los niños tienden a privilegiar las consecuencias inmediatas, especialmente cuando el refuerzo inmediato compite con una recompensa diferida más valiosa (Steinberg, 2008). Los estudios con variantes infantiles de la Iowa Gambling Task han mostrado que la capacidad para renunciar a ganancias inmediatas en favor de resultados a largo plazo más favorables mejora significativamente entre los ocho y los doce años, con una trayectoria que refleja la maduración de la corteza orbitofrontal y del circuito de recompensa ventromedial (Prencipe et al., 2011). Esta

característica madurativa explica por qué las estrategias de refuerzo a largo plazo "si estudias todo el semestre, al final obtendrás una buena nota" tienen menos tracción motivacional en los niños que las estrategias de refuerzo cercano "si terminas este ejercicio correctamente, podrás elegir la siguiente actividad", un fenómeno que el capítulo 4 abordará en detalle al examinar la interacción entre emoción, motivación y aprendizaje.

La asimetría madurativa entre las regiones subcorticales implicadas en la reactividad emocional y la corteza prefrontal encargada de regularla es un factor de especial relevancia durante la transición entre el primer y el segundo ciclo de educación básica. La amígdala y el sistema de recompensa mesolímbico cuyo núcleo funcional incluye el área tegmental ventral y el núcleo accumbens alcanzan niveles funcionales relativamente maduros antes que la corteza prefrontal, lo cual genera un desequilibrio transitorio en el que la intensidad de la reactividad emocional puede superar la capacidad del sistema regulatorio para contenerla y modularla (Casey et al., 2008; Somerville et al., 2010). Este desequilibrio, que se intensifica durante la preadolescencia, explica episodios de impulsividad, reactividad emocional desproporcionada, dificultad para postergar la gratificación, y oscilaciones bruscas en el estado de ánimo que los docentes de cuarto a sexto grado observan con frecuencia y que no deberían interpretar como déficits conductuales o de carácter sino como expresiones de un sistema regulatorio en plena reconfiguración cuyo equilibrio final no se alcanzará hasta años después de concluida la educación básica.

Existe además una dimensión de la inmadurez prefrontal que la investigación ha comenzado a explorar con mayor profundidad en años recientes: la capacidad de prospección, o pensamiento orientado al futuro. Atance y O'Neill (2001) documentaron que la capacidad de los niños para representar mentalmente estados futuros de sí mismos y tomar decisiones basadas en esas representaciones mejora gradualmente durante toda la infancia media, con un salto cualitativo alrededor de los diez años. La prospección requiere la integración de memoria episódica, simulación mental y evaluación prefrontal, lo cual la convierte en una de las operaciones cognitivas de mayor complejidad computacional y, por tanto, de aparición más tardía. Para el docente, esta limitación significa que las apelaciones al futuro lejano "necesitas aprender esto para cuando seas mayor" tienen un impacto motivacional limitado en los alumnos de educación básica, no porque sean irresponsables sino porque su capacidad neurobiológica para representar y valorar emocionalmente ese futuro todavía está construyéndose.

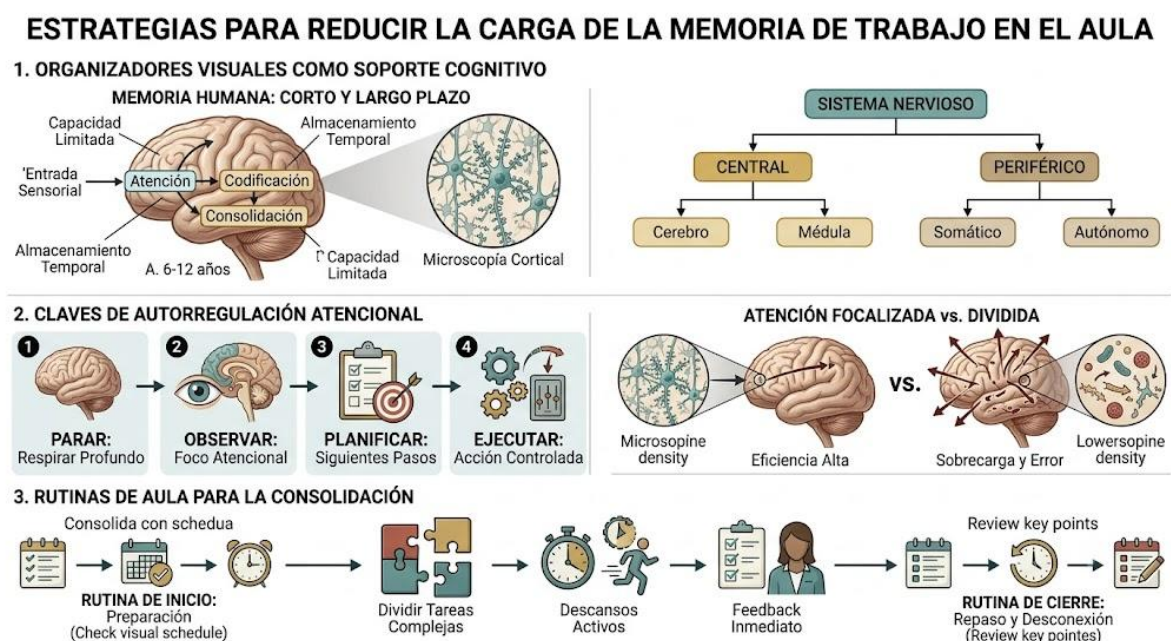
### **3.7. Estrategias docentes para fortalecer la atención sostenida, la memoria de trabajo y la autorregulación cognitiva en el aula**

La traducción de la evidencia neurocognitiva en estrategias didácticas concretas requiere precaución epistemológica: la neurociencia describe mecanismos y limitaciones, pero no prescribe directamente métodos de enseñanza. La inferencia del laboratorio al aula debe pasar por un filtro de viabilidad práctica, sensibilidad contextual y validación pedagógica que evite los simplismos del tipo "como el hipocampo necesita novedad, cada clase debe ser un espectáculo" o "como la corteza prefrontal no ha madurado, no tiene sentido exigir nada a los niños". Dicho esto, la evidencia acumulada permite formular orientaciones con suficiente respaldo para que el docente las incorpore a su repertorio profesional con confianza razonable, siempre que las adapte a las condiciones específicas de su contexto.

La segmentación temporal de la instrucción constituye probablemente la recomendación más robusta que se desprende de la investigación sobre atención infantil. Los datos revisados en la sección 3.2 convergen en que bloques de instrucción directa superiores a quince o veinte minutos para niños de primer ciclo, y a veinticinco o treinta minutos para niños de segundo ciclo, producen rendimientos decrecientes que rápidamente se transforman en rendimientos negativos el alumno no solo deja de aprender sino que la fatiga acumulada afecta su capacidad de procesamiento en la actividad subsiguiente. Organizar la clase en segmentos más breves, alternando entre exposición docente, actividad individual, interacción entre pares y breves pausas de descanso cognitivo, no solo respeta los límites atencionales sino que genera múltiples oportunidades de recodificación que favorecen la consolidación. Tokuhamma-Espinosa (2019) ha propuesto el modelo de "micro-lecciones" como estructura organizativa que permite mantener la coherencia temática con bloques instruccionales de diez a quince minutos intercalados con actividades de procesamiento activo, y estudios piloto en aulas latinoamericanas han reportado mejoras en la retención cuando se adopta esta estructura frente a la clase expositiva continua (Puebla y Talma, 2022).

**Figura 20**

*Estrategias docentes para el andamiaje ejecutivo*



La alternancia modal el cambio deliberado entre modalidades sensoriales de entrada y formatos de procesamiento es una extensión del principio de segmentación que aprovecha la arquitectura multimodal de la atención y la memoria. Presentar un concepto primero verbalmente, luego visualmente, después kinestésicamente, no se justifica por la desacreditada teoría de los estilos de aprendizaje la evidencia empírica contra la idea de que cada alumno tiene un estilo sensorial dominante que debe respetarse es abrumadora (Pashler et al., 2008) sino por la teoría de la codificación dual de Paivio (1986) y por la evidencia de que la redundancia multimodal enriquece la huella mnémica y multiplica las claves de recuperación. Un concepto codificado en múltiples formatos tiene más rutas de acceso que uno codificado en un solo formato, lo cual lo hace más resistente al olvido y más transferible a contextos nuevos.

Para la gestión de la memoria de trabajo, el principio rector es la reducción de la carga extrínseca combinada con la maximización de la carga germinal. En términos prácticos, esto implica simplificar las instrucciones descomponiéndolas en pasos discretos presentados secuencialmente, no simultáneamente, reducir la información visual irrelevante en las presentaciones y materiales impresos el decorado excesivo, las animaciones gratuitas, los múltiples colores sin función informativa compiten por los mismos recursos que el contenido relevante, y proporcionar apoyos externos de memoria como esquemas parcialmente completados, organizadores gráficos, listas de verificación o plantillas de procedimiento que

funcionen como prótesis cognitivas para las operaciones que el niño no puede mantener internamente de forma simultánea. Gathercole y Alloway (2008) desarrollaron un protocolo de adaptación de materiales didácticos para niños con baja memoria de trabajo que ha mostrado beneficios no solo para esa población específica sino para el conjunto del alumnado, un ejemplo del principio de diseño universal según el cual lo que es necesario para algunos resulta beneficioso para todos.

La técnica de "chunking" o agrupamiento, derivada directamente de la investigación sobre los límites de la memoria de trabajo, permite que los alumnos manejen más información de la que su capacidad bruta permitiría al organizar los elementos en unidades significativas de orden superior. Un número de teléfono de diez dígitos excede la capacidad de la memoria de trabajo de un niño si se presenta como diez elementos independientes, pero puede ser manejable si se agrupa en tres o cuatro chunks (tres dígitos, tres dígitos, cuatro dígitos). Del mismo modo, una secuencia de instrucciones puede agruparse en fases con nombres significativos que funcionan como etiquetas de recuperación: "primero la fase de preparación, luego la fase de ejecución, finalmente la fase de verificación". El docente que enseña a sus alumnos a organizar la información en chunks significativos les está proporcionando una estrategia compensatoria que amplía funcionalmente su capacidad de procesamiento sin requerir maduración neural adicional.

La práctica de recuperación espaciada, revisada en la sección 3.4, puede integrarse en la rutina del aula de formas diversas, sencillas y de bajo costo temporal. Iniciar cada clase con un breve ejercicio de recuperación del contenido de la sesión anterior sin consultar apuntes, sin que el docente proporcione las respuestas antes de que los alumnos intenten recordar es una estrategia cuyo coste temporal es de tres a cinco minutos y cuyo beneficio para la retención está ampliamente documentado. Agarwal et al. (2021) reportaron que la implementación sistemática de prácticas de recuperación en aulas de primaria produjo mejoras de retención que se mantenían incluso cuando se evaluaba semanas después de la última práctica, y que los beneficios eran especialmente pronunciados para los alumnos de menor rendimiento. El formato puede variar para evitar la monotonía y para activar diferentes procesos de recuperación: preguntas orales dirigidas al azar dentro de la clase, breves cuestionarios escritos sin calificación, actividades de escritura libre en las que el alumno anota todo lo que recuerda sobre un tema durante dos minutos, ejercicios de evocación por parejas donde un alumno intenta explicar al otro lo aprendido mientras el segundo verifica y complementa, o incluso la técnica de "brain dump" donde los alumnos dibujan un mapa conceptual de memoria antes de compararlo con sus apuntes.

El fortalecimiento de las funciones ejecutivas en el aula, como señalaron Diamond y Ling (2016) en su revisión de la evidencia sobre programas de entrenamiento, parece más efectivo cuando se integra en actividades curriculares significativas que cuando se implementa mediante programas de entrenamiento cognitivo aislados de tipo computarizado. Las actividades que requieren que el niño mantenga una meta en la mente mientras inhibe distractores como los juegos de reglas con condiciones cambiantes, las actividades de lectura compartida donde el alumno debe detectar inconsistencias, o los problemas matemáticos con datos irrelevantes que deben ser descartados, que demandan alternancia entre estrategias como la resolución de problemas con múltiples posibles caminos, las actividades de escritura creativa con restricciones cambiantes, o los debates guiados donde los alumnos deben argumentar alternativamente a favor y en contra, o que exigen planificación de pasos secuenciales como la escritura de textos con estructura previamente acordada, los proyectos de investigación con entregables parciales, o las actividades de laboratorio con procedimientos multietapa son oportunidades naturales de ejercitación ejecutiva que el docente puede potenciar con intención pedagógica. Serpell y Esposito (2016) demostraron que los currícula que incorporan prácticas de autorregulación como el programa Tools of the Mind basado en la teoría vygotskyana producen mejoras en funciones ejecutivas que se transfieren al rendimiento académico en lectura y matemáticas, con efectos particularmente marcados en niños provenientes de entornos socioeconómicamente desfavorecidos.

La autorregulación cognitiva puede fomentarse también mediante la enseñanza explícita de estrategias metacognitivas adaptadas al nivel de desarrollo. Enseñar a los niños a detenerse antes de responder para verificar mentalmente si su respuesta tiene sentido, a subrayar las partes de un problema que consideran clave antes de intentar resolverlo, a verbalizar en voz baja los pasos que están siguiendo mientras realizan una tarea compleja, a formularse preguntas de automonitoreo como "¿entendí esto?" o "¿me acuerdo de por qué estamos haciendo esto?", o a comparar su respuesta con la de un compañero para detectar discrepancias, son prácticas que externalizan los procesos de monitoreo metacognitivo que la corteza prefrontal aún no puede ejecutar de forma autónoma y fluida. Roebbers y Spiess (2022) documentaron que la instrucción explícita en estrategias metacognitivas a partir de tercer grado produce mejoras significativas en la precisión del monitoreo metacognitivo que se mantienen al menos seis meses después de la intervención. La clave está en que estas estrategias no se enseñan como contenido abstracto sobre "aprender a aprender" en una sesión aislada, sino que se modelan, practican y retroalimentan de forma recurrente en el contexto de tareas académicas

reales de diferentes asignaturas, hasta que su uso se automatiza y el andamiaje externo puede retirarse gradualmente.

La regulación del ambiente físico del aula también merece consideración desde la perspectiva atencional y de la carga cognitiva. Estudios recientes han examinado el efecto de la decoración excesiva del aula sobre la atención y el aprendizaje, encontrando que las aulas con paredes densamente cubiertas de material visual pósteres, reglas gramaticales, mapas, trabajos de alumnos, calendarios, sistemas de gestión conductual, recompensas visuales producen mayor distracción y menor aprendizaje que las aulas con decoración moderada y funcionalmente relevante (Fisher et al., 2014; Rodrigues y Pandeirada, 2022). Aunque este hallazgo pueda resultar contraintuitivo para docentes que conciben la abundancia de estímulos visuales como un signo de riqueza pedagógica y de dedicación profesional, la evidencia sugiere que la atención selectiva de los niños, aún en desarrollo, es más vulnerable a la sobrecarga estimular que la de los adultos. Una disposición visual limpia, con los materiales relevantes para la lección en curso expuestos de forma estratégica y el resto almacenado fuera del campo visual o cubierto, constituye un ajuste ambiental simple pero de eficacia comprobada que no requiere inversión económica sino decisión pedagógica.

El manejo del ruido ambiental constituye otro factor que la investigación ha vinculado con la eficiencia atencional y el aprendizaje. Los estudios de Shield y Dockrell (2008), replicados y extendidos por trabajos posteriores, mostraron que los niveles de ruido típicos en muchas aulas escolares que pueden alcanzar los setenta y cinco decibelios durante actividades grupales comprometen la inteligibilidad del habla del docente y aumentan la carga cognitiva que el alumno debe invertir en la mera decodificación del mensaje verbal, reduciendo los recursos disponibles para su elaboración. Los niños son más sensibles que los adultos al efecto del ruido sobre la comprensión, en parte porque su menor familiaridad con el vocabulario y las estructuras gramaticales les impide suplir las palabras perdidas mediante inferencia contextual con la misma eficacia que los adultos (Klatte et al., 2013). La atenuación del ruido de fondo mediante estrategias simples uso de almohadillas en las patas de las sillas, establecimiento de señales no verbales para la gestión del grupo, diferenciación entre momentos de trabajo silencioso y momentos de interacción verbal puede tener efectos positivos sobre el aprendizaje que exceden lo que su sencillez haría suponer.

### **3.8. Lo que el docente puede y no puede esperar de un cerebro ejecutivamente inmaduro**

A lo largo de las páginas precedentes hemos construido un argumento que parte de la neuroanatomía de las redes atencionales, atraviesa la arquitectura de los sistemas de memoria y desemboca en las funciones ejecutivas para converger en una idea que, pese a su aparente sencillez, transforma radicalmente la mirada pedagógica cuando se toma en serio: el cerebro del niño de educación básica no es un cerebro adulto en miniatura, sino un sistema cognitivo cualitativamente distinto, con fortalezas específicas, limitaciones inherentes y una trayectoria madurativa que la enseñanza puede acompañar, facilitar e incluso optimizar, pero no suplantarlo ni forzar más allá de sus posibilidades biológicas.

Esta idea merece un desarrollo detenido porque sus implicaciones prácticas son tan amplias como sistemáticamente ignoradas en los diseños curriculares y las expectativas institucionales de muchos sistemas educativos. La noción de inmadurez ejecutiva no debería leerse como un déficit, como si el cerebro infantil fuera una versión incompleta o averiada que simplemente carece de lo que el cerebro adulto posee. Se trata, más bien, de un diseño adaptativo refinado por millones de años de evolución: un cerebro que privilegia la exploración sobre la explotación, la captura atencional por novedad sobre la persistencia obstinada en un único foco, la reactividad emocional rápida sobre la ponderación analítica lenta, la plasticidad estructural amplia sobre la eficiencia funcional especializada. Estas características, que en el marco de la clase magistral tradicional de cuarenta y cinco minutos se experimentan como obstáculos para la instrucción, son desde una perspectiva evolutiva ventajas adaptativas para un organismo en plena fase de aprendizaje abierto que necesita muestrear su entorno con amplitud y flexibilidad. El niño que se distrae constantemente está, en cierto sentido, muestreando su entorno con una amplitud que el adulto ha perdido; el niño que responde impulsivamente está priorizando la acción exploratoria sobre la deliberación cautelosa; el niño que olvida rápidamente una instrucción verbal compleja está operando dentro de los límites de una memoria de trabajo que aún no ha expandido su capacidad pero que ya le permite funcionar adecuadamente en los contextos interactivos, concretos y emocionalmente ricos para los que evolutivamente fue diseñada (Bjorklund, 2021).

Reconocer esta lógica adaptativa no equivale a renunciar a la exigencia pedagógica, y esta aclaración resulta necesaria porque la invocación de la inmadurez cerebral ha sido utilizada a veces como coartada para rebajar expectativas de forma contraproducente. Lo que la evidencia sugiere no es que debamos exigir menos, sino que debemos exigir diferente: con apoyos adaptados, con temporalidades respetuosas, con formatos que capitalicen las fortalezas

del cerebro infantil en lugar de enfrentarse a sus limitaciones. La distinción vygotskyana entre la zona de desarrollo actual y la zona de desarrollo próximo adquiere aquí una fundamentación neurobiológica precisa: la zona de desarrollo próximo, para las funciones ejecutivas, es aquel espacio donde la tarea demanda un nivel de control ejecutivo que el niño no puede alcanzar solo pero sí con el andamiaje proporcionado por un adulto o un par más competente.

Lo que el docente puede razonablemente esperar de un niño de primer grado es que mantenga la atención durante períodos breves de cinco a diez minutos en tareas que le resulten comprensibles y moderadamente novedosas, que retenga instrucciones simples de dos o tres pasos presentados secuencialmente, que inhiba respuestas impulsivas con ayuda de claves ambientales externas como un semáforo visual que indique cuándo es momento de hablar y cuándo de escuchar, o una señal gestual acordada que funcione como recordatorio del turno, y que comience a desarrollar hábitos rudimentarios de planificación con guía explícita y constante del adulto. Lo que puede esperar de un niño de tercer grado es una atención sostenida algo más prolongada de diez a quince minutos, la capacidad de retener instrucciones de tres a cuatro pasos, una inhibición más consistente, aunque todavía vulnerable a la fatiga y a las condiciones emocionales, y una planificación incipiente que permite organizar una tarea de complejidad moderada con andamiaje parcial. Lo que puede esperar de un niño de sexto grado es una atención sostenida que se aproxima a los veinte o veinticinco minutos en tareas motivantes, una memoria de trabajo que maneja cuatro o cinco elementos simultáneamente, una inhibición razonablemente estable, aunque aún susceptible al estrés y a la influencia social de los pares, y una planificación que abarca secuencias de varios pasos pero que todavía se beneficia de la supervisión externa para proyectos de largo plazo.

Lo que no puede esperar y aquí es donde muchos sistemas educativos incurren en un error de diseño que produce sufrimiento innecesario en alumnos y docentes es que un niño de primer grado planifique autónomamente un proyecto de varios días sin orientación paso a paso, que regule su comportamiento social sin supervisión constante, que monitoree su propia comprensión para detectar cuándo necesita pedir ayuda, o que mantenga la motivación hacia una meta cuya recompensa se sitúa a semanas de distancia. Tampoco puede esperar que un niño de tercer grado gestione independientemente su tiempo durante un examen de cuarenta y cinco minutos con múltiples secciones, que determine por sí solo qué estrategia de estudio le conviene para cada tipo de material, o que evalúe la calidad de su propio trabajo con la precisión que el docente juzga deseable. Ni puede esperar que un niño de sexto grado, pese a sus evidentes avances ejecutivos, sostenga la misma consistencia de rendimiento que un adulto a lo largo de un día escolar de siete horas, que autorregule sus emociones frente a la frustración

académica o social con la madurez que el docente querría, o que se motive intrínsecamente por contenidos cuya relevancia personal no percibe.

La brecha entre lo que el currículo asume y lo que el cerebro del niño puede ofrecer genera una de las dinámicas más nocivas del sistema educativo: la patologización de la inmadurez normal. Cuando las expectativas institucionales no se ajustan al cronograma madurativo, los niños que se comportan de forma plenamente compatible con su etapa de desarrollo cerebral son identificados como problemáticos, distraídos, indisciplinados, hiperactivos, desmotivados o académicamente incompetentes. La literatura sobre sobrediagnóstico de trastorno por déficit de atención con hiperactividad en niños nacidos en los últimos meses del año escolar que son por tanto los más jóvenes de su cohorte y los más inmaduros ejecutivamente ofrece una ilustración elocuente y preocupante de este fenómeno (Elder, 2010; Whitely et al., 2019). Layton et al. (2022) replicaron estos hallazgos en una muestra de más de cuatrocientos mil niños y encontraron que la probabilidad de recibir un diagnóstico de TDAH era un treinta y cinco por ciento mayor para los niños nacidos en diciembre que para los nacidos en enero del mismo año, siendo la única diferencia entre ambos grupos su posición relativa dentro de la cohorte escolar y, por tanto, su grado relativo de maduración ejecutiva. Este dato, que revela hasta qué punto las expectativas normativas del sistema puede confundir inmadurez con patología y edad cronológica con capacidad cognitiva, debería ser de conocimiento obligatorio para todo docente, directivo escolar, psicólogo educativo y responsable de política curricular.

La patologización no se limita a los diagnósticos formales. En la cotidianidad del aula, se manifiesta cada vez que un docente interpreta como falta de voluntad lo que es limitación madurativa, cada vez que atribuye a desinterés personal lo que es fatiga atencional, cada vez que sanciona como mala conducta lo que es fallo inhibitorio transitorio, cada vez que exige revisión autónoma del trabajo a un niño cuyo sistema metacognitivo no tiene la capacidad de detectar sus propios errores. Estas interpretaciones erróneas no son maliciosas; surgen de una formación profesional que, en la mayoría de los sistemas educativos, no incluye la neurociencia del desarrollo como componente formativo obligatorio. El docente que carece de este marco interpretativo recurre inevitablemente a explicaciones motivacionales o conductuales que, si bien son intuitivas, resultan con frecuencia inexactas y conducen a intervenciones ineficaces cuando no contraproducentes.

La pregunta pedagógica que se desprende de toda la evidencia revisada en este capítulo no es cómo hacer que los niños superen sus limitaciones ejecutivas pues estas son inherentes a su etapa madurativa y desaparecerán, en su mayor parte, con el tiempo, sino cómo diseñar

entornos de aprendizaje que funcionen eficazmente dentro de esas limitaciones mientras las expanden gradualmente. El concepto de andamiaje cognitivo, proveniente de la tradición sociocultural y formulado originalmente por Wood, Bruner y Ross (1976), adquiere aquí una fundamentación neurobiológica precisa que le otorga una legitimidad adicional: el andamiaje docente opera como una extensión funcional de la corteza prefrontal del niño, proporcionando externamente las funciones de planificación, monitoreo, inhibición y flexibilidad que su corteza aún no puede sustentar de forma autónoma. Cada vez que el docente descompone una tarea compleja en pasos manejables, ofrece una lista de verificación para guiar la ejecución, proporciona retroalimentación inmediata sobre errores antes de que se consoliden, utiliza señales ambientales para regular la conducta del grupo, o modela en voz alta los procesos de pensamiento que quiere que sus alumnos aprendan a ejecutar internamente, está actuando como un lóbulo frontal externo que compensa temporalmente la inmadurez prefrontal de sus alumnos y, al mismo tiempo, modela los procesos que esos alumnos irán internalizando progresivamente a medida que su corteza madure y las experiencias acumuladas consoliden las rutas neurales correspondientes (Bodrova y Leong, 2015).

Una dimensión que los docentes necesitan incorporar con particular claridad a su comprensión profesional es la variabilidad intraindividual en el funcionamiento ejecutivo, un fenómeno mencionado a lo largo de este capítulo, pero cuya importancia práctica merece ser enfatizada con datos concretos en este cierre. El mismo niño que un martes resolvió con éxito un problema de planificación puede fracasar en una tarea equivalente el miércoles, no porque haya "olvidado" la habilidad o porque haya decidido no esforzarse, sino porque su nivel de funcionamiento ejecutivo fluctúa significativamente en función del sueño de la noche anterior, la calidad de la nutrición matutina, el estado emocional generado por eventos familiares o sociales, la hora del día, la acumulación de demandas inhibitorias previas, el nivel de ruido ambiental, la temperatura del aula, y múltiples factores adicionales cuya interacción produce una oscilación constante en el rendimiento que resulta desconcertante para el observador que espera consistencia (Willoughby et al., 2022). Los docentes que interpretan esta fluctuación como inconsistencia voluntaria, pereza intermitente o manipulación están aplicando al niño un modelo adulto de estabilidad cognitiva que no corresponde a su realidad neurobiológica. La consecuencia práctica más directa de esta comprensión es que la evaluación del funcionamiento ejecutivo y del rendimiento académico debería basarse en múltiples observaciones distribuidas en el tiempo, nunca en una sola instancia que podría no representar la capacidad real del alumno y cuyo resultado podría deberse a una fluctuación transitoria y no a una incapacidad estable.

Conviene también que el docente comprenda con honestidad los límites de lo que la instrucción directa puede lograr respecto al desarrollo ejecutivo. La corteza prefrontal madura en un cronograma que combina factores genéticos de temporalización genes que regulan la proliferación, migración y diferenciación neuronal, la sinaptogénesis y la mielinización con factores experienciales la calidad de la estimulación cognitiva, la riqueza del lenguaje en el entorno, el estrés crónico, la calidad del sueño, la nutrición, y la evidencia disponible indica que, si bien las experiencias de aprendizaje enriquecidas pueden optimizar la trayectoria madurativa dentro del rango que la biología permite, no pueden alterar sustancialmente ese rango ni adelantar significativamente su cronograma (Fandakova y Hartley, 2020). En términos llanos, un docente excelente puede lograr que un niño de ocho años alcance el máximo de su potencial ejecutivo para esa edad, pero no puede hacer que ese niño funcione ejecutivamente como uno de doce.

La tentación de buscar entrenamientos cognitivos intensivos que "aceleren" la maduración prefrontal una promesa frecuente en la industria del entrenamiento cognitivo computarizado y del neuromárketing educativo debe contemplarse con escepticismo informado, ya que las revisiones más rigurosas de esta literatura han mostrado que los efectos de transferencia de estos entrenamientos a habilidades académicas son modestos, inconsistentes o nulos cuando se controlan adecuadamente los efectos placebo y de expectativa (Sala y Gobet, 2017; Diamond y Ling, 2020). El fortalecimiento ejecutivo más robusto y duradero parece producirse no mediante ejercicios descontextualizados de memoria de trabajo o inhibición administrados en una pantalla, sino mediante la participación sostenida en actividades cognitivamente demandantes que tienen significado personal y social para el niño: la lectura sostenida de textos que le interesan, la resolución de problemas auténticos cuya respuesta desea conocer, el juego simbólico complejo que exige mantener y negociar reglas ficticias, la producción artística que exige planificación y revisión, el deporte que demanda estrategia y autorregulación en tiempo real, y la participación en proyectos colaborativos donde la coordinación con otros exige control ejecutivo al servicio de metas compartidas.

La tensión entre expectativas curriculares y posibilidades madurativas adquiere una dimensión ética que no puede eludirse y que este capítulo no debería cerrar sin abordar. Cuando un sistema educativo exige que todos los niños de primer grado dominen la lectura fluida al final del año, o que todos los alumnos de tercer grado manejen las cuatro operaciones aritméticas con soltura, está imponiendo un criterio temporal uniforme a una población cuyo rango de variabilidad madurativa en los circuitos responsables de esas habilidades puede abarcar dos o tres años según la evidencia disponible. Los niños que no alcanzan ese criterio

en el plazo establecido no son necesariamente portadores de un trastorno del aprendizaje ni de un déficit cognitivo permanente; algunos son simplemente más lentos en su cronograma madurativo particular, y alcanzarán las mismas competencias uno o dos años después sin otra intervención que el paso del tiempo, la maduración neural que ese tiempo permite, y una instrucción continuada y respetuosa. Diferenciar entre retraso madurativo transitorio y trastorno genuino del neurodesarrollo es una de las tareas diagnósticas más delicadas y de mayor consecuencia que enfrentan los profesionales vinculados a la educación, y la distinción será objeto de análisis pormenorizado en el capítulo 7 al abordar la neurodiversidad y los trastornos del neurodesarrollo.

El vínculo con el capítulo siguiente se teje de forma natural desde este punto, porque la regulación emocional tema central del capítulo 4 no es una función separada de las funciones ejecutivas sino una manifestación de ellas en el dominio afectivo. La capacidad de un niño para regular su frustración ante una tarea difícil, para mantener la motivación cuando el refuerzo se demora, para gestionar la ansiedad ante una evaluación, o para reparar su estado emocional tras un conflicto social depende de los mismos circuitos prefrontales cuya inmadurez hemos analizado a lo largo de estas páginas. Comprender que la regulación emocional es una función ejecutiva aplicada a las emociones, y no una cualidad de carácter independiente de la neurobiología, permitirá al lector integrar los contenidos de ambos capítulos en un marco explicativo coherente que relaciona la cognición, la emoción y el aprendizaje como dimensiones inseparables de la experiencia escolar del niño.

# CAPÍTULO 4

**Emociones y aprendizaje: el papel del sistema límbico en la motivación escolar**

## Introducción

Cualquier docente con experiencia suficiente en el aula reconoce, aunque no siempre disponga del vocabulario técnico para articularlo, que un niño asustado no aprende, que un niño humillado se repliega, que un niño aburrido desconecta y que un niño entusiasmado puede sorprender incluso a quien mejor lo conoce. Estas observaciones, acumuladas durante siglos de práctica pedagógica, han sido tratadas con frecuencia como intuiciones artesanales, como saberes del oficio que pertenecen al territorio de la sensibilidad personal del docente y no al dominio de la ciencia educativa. La neurociencia cognitiva y afectiva de las últimas tres décadas ha venido a demostrar que esas intuiciones reflejan con notable fidelidad el modo en que el cerebro humano organiza la relación entre los estados emocionales y los procesos cognitivos que hacen posible el aprendizaje. Lo que el docente experimentado percibe como una conexión entre el estado anímico del estudiante y su capacidad de aprender tiene correlatos neurobiológicos precisos, identificables mediante técnicas de neuroimagen, cuantificables mediante marcadores neuroendocrinos y modificables mediante intervenciones pedagógicas deliberadas.

La tradición racionalista que dominó el pensamiento educativo occidental concibió las emociones como perturbaciones del intelecto, fuerzas irracionales que debían ser contenidas o ignoradas para que la razón pudiera operar sin interferencias. El aula propiamente dicha el espacio donde se enseñaban las matemáticas, la lengua, las ciencias se concebía como un territorio cognitivo donde las emociones resultaban, en el mejor de los escenarios, irrelevantes y, en el peor, disruptivas. Antonio Damasio cuestionó esa separación desde sus cimientos cuando publicó *El error de Descartes* (1994), reuniendo evidencia clínica y experimental para argumentar que la emoción y la razón no constituyen facultades opuestas sino procesos interdependientes, neuroanatómicamente entrelazados. Sus pacientes con lesiones en la corteza ventromedial prefrontal conservaban intactas sus capacidades de razonamiento abstracto pero se mostraban incapaces de tomar decisiones sensatas en la vida cotidiana, precisamente porque habían perdido el acceso a las señales emocionales que normalmente guían la deliberación humana. Immordino-Yang (2016) llevó esta comprensión directamente al terreno educativo al formular una proposición que sintetiza el argumento central de este capítulo: no es posible pensar profundamente sobre algo que no nos importa, porque el mismo acto de asignar importancia es un acto emocional mediado por circuitos cerebrales que integran valoración afectiva y procesamiento cognitivo. La emoción no antecede al aprendizaje como un requisito previo; la emoción atraviesa el aprendizaje en cada una de sus fases, desde la captura atencional

inicial hasta la consolidación mnésica, desde la recuperación del conocimiento almacenado hasta su transferencia a situaciones nuevas.

Este capítulo se propone ofrecer al docente de educación básica un recorrido riguroso por la neurobiología de la emoción y su relación con los procesos de aprendizaje. Comenzaremos examinando las estructuras cerebrales que constituyen los circuitos de valoración afectiva la amígdala, la corteza orbitofrontal, la ínsula y sus interconexiones para comprender cómo el cerebro del niño evalúa continuamente la relevancia emocional de lo que ocurre en el aula. Exploraremos la hipótesis del marcador somático y su aplicación a las microdecisiones que los estudiantes toman cotidianamente en el entorno escolar. Abordaremos los circuitos de recompensa y la neuroquímica de la motivación intrínseca, examinando qué condiciones activan y cuáles desactivan el deseo de aprender en el cerebro infantil. Recorreremos el funcionamiento del eje hipotalámico-hipofisario-adrenal y los efectos del cortisol sobre la memoria y las funciones ejecutivas, estableciendo la distinción entre niveles de estrés que facilitan el aprendizaje y niveles que lo comprometen severamente. Analizaremos la regulación emocional infantil como una capacidad en desarrollo que depende de la maduración de circuitos prefrontales y de la correulación proporcionada por los adultos significativos. Cerraremos con una revisión de los programas de aprendizaje socioemocional que cuentan con evidencia empírica de eficacia y fundamentación neurocientífica explícita.

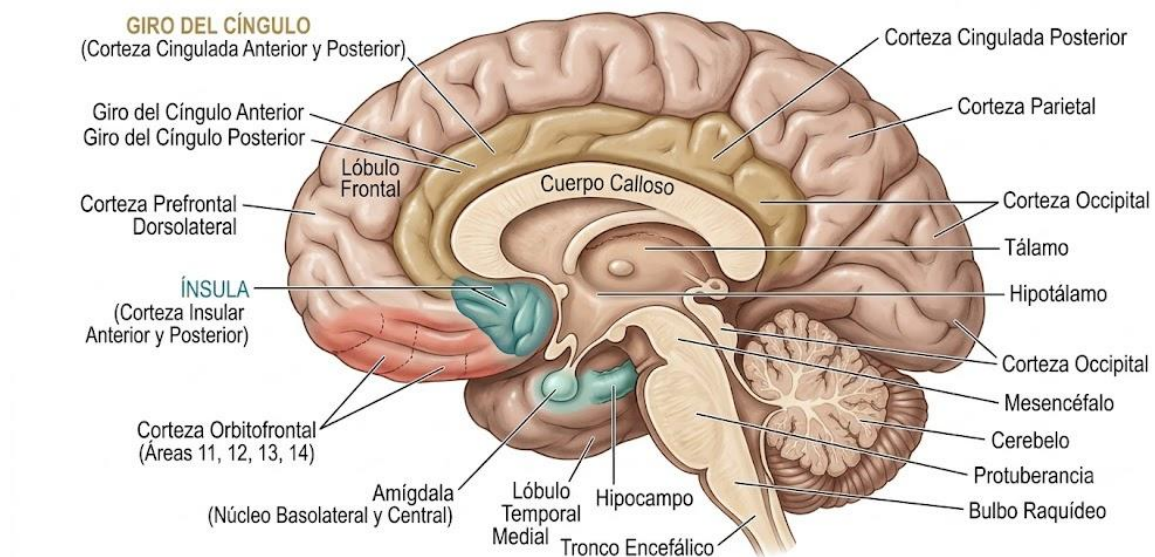
El hilo conductor que vertebra el conjunto es una convicción fundamentada en evidencia: comprender cómo el cerebro procesa las emociones no es un conocimiento decorativo para el docente. Es un conocimiento que transforma la mirada sobre lo que ocurre en el aula, que permite interpretar conductas estudiantiles aparentemente inexplicables a la luz de mecanismos neurobiológicos identificables, y que abre la puerta a intervenciones pedagógicas cuya eficacia se sustenta en la comprensión de cómo funciona el órgano que hace posible todo aprendizaje. Un docente que entiende las emociones desde su base neural dispone de herramientas conceptuales para diseñar entornos de aprendizaje que trabajen con el cerebro del niño y no contra él, maximizando las condiciones que la neurociencia ha identificado como facilitadoras del aprendizaje profundo y minimizando aquellas que la evidencia ha documentado como obstáculos neurobiológicos para la cognición eficiente.

#### 4.1. Neurobiología de la emoción: amígdala, corteza orbitofrontal, ínsula y circuitos de valoración afectiva

**Figura 21**

*Anatomía del Sistema Límbico y circuitos afectivos*

##### VISTA MEDIAL DEL CEREBRO: ESTRUCTURAS CLAVE DE LA EMOCIÓN Y EL CONTROL



Durante décadas, la tradición pedagógica occidental operó bajo un supuesto que la neurociencia contemporánea ha desmantelado con evidencia contundente: la idea de que el aprendizaje genuino debía transcurrir en un espacio racional, desprovisto de interferencias emocionales, como si la cognición pudiera funcionar en vacío afectivo. Esa separación cartesiana entre razón y emoción, que permeó los diseños curriculares y las prácticas evaluativas durante buena parte del siglo XX, resulta insostenible cuando se examina la arquitectura funcional del cerebro humano. Las estructuras que procesan la información emocional no constituyen un sistema paralelo e independiente de las redes cognitivas; forman parte integral de los mismos circuitos que sostienen la atención, la consolidación mnésica y la toma de decisiones. Comprender esta imbricación y sus consecuencias para lo que ocurre cotidianamente en un aula de educación básica exige recorrer con cierto detalle la neurobiología de la emoción, empezando por las estructuras subcorticales y corticales que conforman los circuitos de valoración afectiva, para luego examinar cómo esas estructuras interactúan dinámicamente durante las experiencias de aprendizaje.

La amígdala, un conjunto bilateral de núcleos con forma almendrada ubicado en la profundidad del lóbulo temporal medial, ha sido identificada desde los trabajos pioneros de

LeDoux (1996) como una estructura central en la detección rápida de estímulos con relevancia biológica, particularmente aquellos asociados al miedo y la amenaza. Reducir la amígdala a un "centro del miedo", sin embargo, constituiría una simplificación que la investigación reciente ha corregido de forma sustancial. Estudios con resonancia magnética funcional han demostrado que la amígdala responde a la novedad, a la ambigüedad y a cualquier estímulo que posea valencia afectiva significativa, ya sea positiva o negativa (Pessoa, 2017). La amígdala no discrimina entre valencias; lo que detecta es la relevancia. Un rostro desconocido, un sonido inesperado, una palabra pronunciada con un tono emocional particular, una imagen que rompe las expectativas del sujeto: todos estos estímulos activan los núcleos amigdalinos con una rapidez que precede al análisis cortical detallado. En el contexto escolar, esto implica que la amígdala de un niño de siete años se activa tanto ante una amenaza percibida un comentario humillante de un compañero, la anticipación de un examen para el que no se siente preparado, la mirada de desaprobación del docente como ante un evento que despierte curiosidad intensa o sorpresa placentera, como un experimento científico inesperado o el descubrimiento súbito de un patrón en una secuencia numérica.

La investigación de Todorov et al. (2023) ha documentado mediante registros de conectividad funcional que la amígdala establece proyecciones bidireccionales con la corteza prefrontal, el hipocampo y el núcleo accumbens, de modo que su activación no constituye un evento aislado sino un nodo dentro de redes amplias que modulan simultáneamente el procesamiento cognitivo y motivacional. La vía que conecta la amígdala con el hipocampo reviste particular interés para la educación: a través de esta conexión, la activación emocional modula directamente la consolidación de memorias declarativas, fortaleciendo el almacenamiento de aquella información que se procesa en un contexto de activación afectiva. Phelps (2004) demostró experimentalmente que las palabras presentadas en un contexto emocionalmente activador se recordaban con mayor precisión y durante más tiempo que las palabras presentadas en condiciones emocionalmente neutras, y que este efecto dependía de la integridad funcional del circuito amígdala-hipocampo. Desde la perspectiva educativa, un dato merece subrayarse: la velocidad con la que la amígdala procesa la información emocional del orden de milisegundos, a través de la vía talámica directa descrita por LeDoux supera con creces la velocidad del procesamiento cortical deliberado. El estudiante ya ha experimentado una respuesta emocional ante la tarea antes de que su corteza prefrontal haya tenido oportunidad de evaluar racionalmente la situación. Esta asimetría temporal tiene consecuencias pedagógicas que desarrollaremos con detenimiento en secciones posteriores, pero que conviene anticipar aquí: la primera impresión emocional que genera una actividad escolar condiciona el

procesamiento cognitivo subsiguiente, lo cual confiere una importancia extraordinaria al modo en que los docentes introducen las tareas, formulan las consignas y gestionan los primeros minutos de cada secuencia didáctica.

La diferenciación funcional dentro de la propia amígdala añade complejidad al cuadro. Los núcleos basolaterales reciben inputs sensoriales procesados tanto por la vía talámica rápida como por la vía cortical lenta y participan en el aprendizaje asociativo emocional, mientras que el núcleo central coordina las respuestas autonómicas, endocrinas y conductuales asociadas a los estados emocionales (Davis y Whalen, 2001). En términos prácticos, esto significa que la amígdala no solo detecta la relevancia emocional de un estímulo, sino que simultáneamente dispara respuestas corporales: aceleración cardíaca, sudoración palmar, tensión muscular, alteraciones respiratorias que el estudiante experimenta como sensaciones físicas asociadas a la emoción. Un niño que siente "mariposas en el estómago" antes de una exposición oral está experimentando la cascada autonómica coordinada por el núcleo central de la amígdala, y esa experiencia corporal retroalimenta el procesamiento emocional cortical a través de las vías interoceptivas que convergen en la ínsula, generando un circuito de amplificación que puede intensificar la ansiedad si no se dispone de estrategias de regulación adecuadas.

La corteza orbitofrontal, situada en la superficie ventral del lóbulo frontal justo por encima de las órbitas oculares, cumple funciones que resultan particularmente relevantes para la vida escolar aunque rara vez se mencionen en los textos de didáctica general. Esta región cortical integra información sensorial, emocional y contextual para generar lo que podríamos denominar valoraciones afectivas complejas: juicios rápidos sobre si una situación, una tarea o una interacción social es beneficiosa, amenazante, gratificante o irrelevante (Rolls, 2019). Cuando un estudiante decide si vale la pena esforzarse en una actividad, cuando evalúa si la retroalimentación del docente es justa, cuando sopesa el riesgo social de levantar la mano para responder una pregunta frente a toda la clase, la corteza orbitofrontal participa activamente en esos cálculos, integrando señales que provienen tanto del cuerpo: estados viscerales, tensión muscular, ritmo cardíaco como de la memoria de experiencias previas almacenadas en el hipocampo y en redes corticales distribuidas.

Las lesiones en esta región, documentadas tanto en estudios clásicos con pacientes adultos como en investigaciones más recientes con poblaciones pediátricas, producen alteraciones profundas en la capacidad de tomar decisiones socialmente adaptativas, aun cuando las habilidades intelectuales medidas por pruebas estandarizadas permanezcan intactas (Bechara y Damasio, 2005). El caso clásico de Phineas Gage, revisitado con técnicas modernas de reconstrucción lesional por Damasio y colaboradores, ilustra con elocuencia esta

disociación: un individuo puede conservar su capacidad de razonamiento abstracto y, sin embargo, perder la brújula emocional que le permite navegar eficazmente en el mundo social. La corteza orbitofrontal, además, madura lentamente durante la infancia y la adolescencia, con trayectorias de desarrollo que se extienden hasta la tercera década de vida (Gogtay et al., 2004). Esta prolongada ventana madurativa explica por qué los niños pequeños muestran una mayor dependencia de los marcadores emocionales inmediatos y una menor capacidad para integrar marcadores asociados a consecuencias diferidas, y por qué la retroalimentación inmediata y afectivamente significativa resulta más eficaz para guiar el aprendizaje que las advertencias diferidas sobre consecuencias futuras. También explica por qué los niños en educación básica necesitan un andamiaje externo proporcionado por docentes y cuidadores para funciones de valoración afectiva que los adultos realizan de forma más autónoma.

Conviene detenerse brevemente en otra función de la corteza orbitofrontal que tiene resonancias pedagógicas directas: su participación en el aprendizaje de contingencias de reforzamiento y, particularmente, en la actualización de esas contingencias cuando cambian las condiciones del entorno. Rolls (2019) ha documentado que la corteza orbitofrontal es especialmente activa durante la reversión de aprendizajes previos cuando una respuesta que antes era recompensada deja de serlo, o cuando una opción previamente neutra adquiere valor. Esta función resulta central para la flexibilidad conductual y cognitiva. Un estudiante que ha aprendido que levantar la mano para participar genera aprobación del docente y que luego cambia de profesor a uno que castiga la participación espontánea necesita actualizar sus contingencias afectivas, y ese proceso de actualización depende críticamente de la corteza orbitofrontal. La dificultad que algunos niños muestran para adaptarse a nuevos docentes, nuevas reglas de aula o nuevas dinámicas de grupo puede tener, al menos parcialmente, una base neurobiológica relacionada con la velocidad de actualización de estas contingencias afectivas.

La ínsula, una estructura cortical plegada y oculta dentro de la cisura lateral, ha ganado protagonismo creciente en la neurociencia afectiva de los últimos quince años gracias, en buena medida, a los trabajos de Bud Craig y su modelo de integración interoceptiva. Craig (2009) propuso que la ínsula anterior funciona como un centro de integración que recibe información sobre el estado fisiológico del organismo temperatura corporal, frecuencia cardíaca, distensión gástrica, nivel de hidratación, tensión muscular, dolor, fatiga y genera representaciones conscientes de esos estados que experimentamos subjetivamente como sentimientos. La ínsula no solo registra pasivamente el estado del cuerpo; construye una imagen momento a momento de cómo se siente el organismo, y esa imagen constituye el sustrato neural de la experiencia

emocional subjetiva. Cuando un niño dice "me siento mal" pero no puede especificar qué le sucede, está describiendo un fenómeno que tiene un correlato insular preciso: la percepción difusa de señales corporales que aún no ha aprendido a categorizar con la finura léxica y conceptual que permitiría una comunicación más específica.

Silvers et al. (2021) han mostrado que la maduración funcional de la ínsula se correlaciona con la capacidad de identificar y nombrar estados emocionales propios, una competencia que la literatura sobre aprendizaje socioemocional denomina conciencia emocional y que constituye un prerrequisito para la regulación afectiva deliberada. La diferenciación funcional entre la ínsula anterior y la ínsula posterior añade un matiz adicional: mientras que la ínsula posterior procesa la información interoceptiva primaria de forma relativamente automática, la ínsula anterior integra esa información con datos contextuales, mnésicos y sociales para generar estados emocionales conscientes más elaborados (Chang et al., 2013). Esta progresión de procesamiento desde la señal corporal bruta hasta el sentimiento consciente contextualizado requiere maduración y experiencia, y puede ser facilitada por prácticas educativas que ayuden al niño a desarrollar un vocabulario emocional rico y una capacidad de introspección corporal afinada.

Que la ínsula procese simultáneamente señales del cuerpo y contribuya a la experiencia emocional consciente tiene una consecuencia práctica que los docentes observan a diario sin necesariamente comprender sus bases neurobiológicas: un estudiante que tiene hambre, que ha dormido poco, que siente dolor o malestar físico, que está procesando un estado de ansiedad difusa, procesa la información académica de manera cualitativamente diferente, no solo porque esté "distráido" en un sentido superficial, sino porque el sustrato neural que necesita para generar estados emocionales compatibles con el aprendizaje comprometido se encuentra ocupado prioritariamente en el procesamiento de señales homeostáticas. La ínsula, en este sentido, funciona como un árbitro silencioso que determina qué demandas las del cuerpo o las del entorno académico reciben prioridad en el procesamiento neural en cada momento dado.

Estos tres nodos amígdala, corteza orbitofrontal e ínsula no operan como unidades independientes sino como componentes de circuitos de valoración afectiva que procesan continuamente la relevancia emocional de los estímulos del entorno. Lindquist et al. (2012) propusieron, dentro de la teoría de la emoción construida, que las emociones no emergen de regiones cerebrales específicas dedicadas a cada categoría emocional discreta un centro para el miedo, otro para la tristeza, otro para la alegría sino de la interacción dinámica entre redes distribuidas que combinan información sensorial, interoceptiva, mnésica y conceptual para construir experiencias emocionales categorizadas culturalmente. Barrett (2017), en una

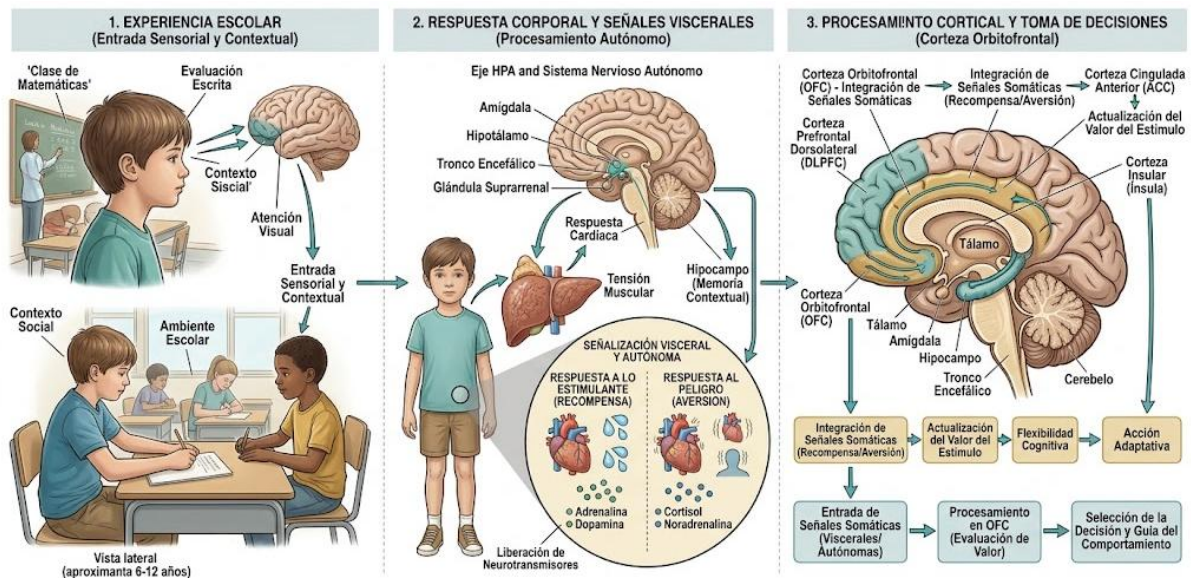
elaboración posterior de este marco teórico, argumentó que el cerebro funciona como una máquina predictiva que genera anticipaciones continuas sobre el estado del cuerpo y del mundo, y que las emociones surgen cuando esas predicciones se confrontan con las señales sensoriales reales, generando señales de error predictivo que requieren actualización de los modelos internos.

Esta perspectiva tiene implicaciones profundas para la práctica docente, porque sugiere que la experiencia emocional del estudiante en el aula no está determinada únicamente por el estímulo presente la tarea, la instrucción, la evaluación sino por la confluencia de su estado corporal, sus experiencias previas con situaciones análogas, los conceptos emocionales que ha aprendido a manejar y el contexto social inmediato en el que se encuentra. Un mismo problema matemático puede generar curiosidad en un estudiante que ha acumulado historias de éxito con desafíos cognitivos, y ansiedad paralizante en otro cuyas experiencias previas le han enseñado que equivocarse tiene consecuencias sociales negativas. El cerebro no responde al estímulo objetivo, sino a la construcción predictiva que elabora sobre ese estímulo a partir de múltiples fuentes de información convergentes. Para el docente, esta comprensión debería traducirse en una atención cuidadosa no solo al contenido de las tareas que propone, sino al andamiaje emocional con el que las presenta, al historial afectivo que cada estudiante trae consigo respecto a ese tipo de tareas, y al microclima social del aula que puede amplificar o amortiguar las respuestas emocionales individuales.

## 4.2. La hipótesis del marcador somático y su aplicación a la toma de decisiones en el contexto escolar

**Figura 22**

*Mecanismo de la Hipótesis del Marcador Somático*



Antonio Damasio formuló la hipótesis del marcador somático a principios de la década de 1990, y su influencia sobre la comprensión de la relación entre emoción y cognición sigue siendo extraordinaria tres décadas después. La formulación original planteaba que las decisiones racionales no se toman exclusivamente mediante un análisis lógico de costos y beneficios, sino que dependen de señales corporales marcadores somáticos asociadas a las consecuencias emocionales de experiencias pasadas (Damasio, 1994). Cuando un individuo se enfrenta a una decisión, su cerebro no recorre exhaustivamente todas las opciones posibles mediante un cálculo proposicional; en lugar de ello, las señales somáticas asociadas a resultados previos similares "marcan" ciertas opciones como ventajosas o peligrosas antes de que el razonamiento consciente entre en juego, canalizando la deliberación hacia un subconjunto manejable de alternativas. La corteza orbitofrontal y la corteza ventromedial prefrontal funcionan como interfaces entre estas señales corporales y los procesos decisorios de orden superior, integrando la información que llega desde la amígdala, la ínsula y las representaciones somatosensoriales con las representaciones cognitivas de las opciones disponibles.

El soporte empírico de esta hipótesis se consolidó a través de la Iowa Gambling Task, un paradigma experimental en el que los participantes deben elegir cartas de cuatro mazos con

diferentes perfiles de ganancia y pérdida. Los individuos con la corteza ventromedial prefrontal intacta desarrollan progresivamente una "intuición" sobre cuáles mazos son desventajosos registrada fisiológicamente como respuestas galvánicas anticipatorias de la piel incluso antes de poder articular verbalmente las reglas del juego. Los pacientes con lesiones en esta región, pese a comprender intelectualmente las reglas y a poder describir la estructura de riesgos de la tarea, persistían en seleccionar las opciones desventajosas porque carecían de los marcadores somáticos que señalizan el peligro antes de la toma de decisión consciente (Bechara et al., 1994).

¿Qué tiene que ver esto con un aula de tercer grado? Más de lo que podría parecer a primera vista. Cada jornada escolar confronta a los estudiantes con decenas de microdecisiones que no suelen conceptualizarse como tales: decidir si prestar atención a la explicación del docente o a la conversación del compañero de al lado, decidir si intentar resolver un problema desafiante o esperar a que alguien más lo resuelva, decidir si pedir ayuda cuando algo no se comprende o permanecer en silencio para evitar la exposición social, decidir si persistir en una tarea difícil o abandonarla cuando la frustración aumenta, decidir si arriesgarse a dar una respuesta posiblemente incorrecta o protegerse del error manteniéndose invisible. Cada una de estas decisiones está mediada por marcadores somáticos que se han ido configurando a lo largo de la historia de aprendizaje del niño. Un estudiante que ha experimentado repetidamente que participar en clase conduce a retroalimentación positiva del docente y reconocimiento de los compañeros ha desarrollado marcadores somáticos positivos asociados a la participación que, literalmente, lo predisponen corporalmente a levantar la mano. Otro estudiante que ha experimentado burlas, correcciones humillantes o indiferencia como consecuencia de sus intentos de participación ha desarrollado marcadores somáticos negativos tensión muscular, opresión torácica, malestar visceral que se activan anticipatoriamente cada vez que se presenta una oportunidad de participar, disuadiéndolo antes de que su razonamiento consciente intervenga.

Bechara y Damasio (2005) demostraron que pacientes con daño en la corteza ventromedial prefrontal podían razonar correctamente sobre las reglas de una tarea pero fallaban sistemáticamente al aplicar ese conocimiento en situaciones que requerían integrar información emocional, precisamente porque carecían de las señales somáticas que normalmente guían las decisiones hacia opciones adaptativas. Este hallazgo tiene un correlato educativo que merece atención: la brecha frecuente entre lo que un estudiante sabe que debería hacer y lo que efectivamente hace no siempre obedece a falta de conocimiento, falta de voluntad o déficit atencional, sino que puede reflejar un conflicto entre los marcadores

somáticos adquiridos y las demandas de la situación. Un niño puede saber perfectamente que debe levantar la mano antes de hablar, que debe intentar los ejercicios antes de pedir ayuda, que debe revisar su trabajo antes de entregarlo, y sin embargo no hacerlo porque sus marcadores somáticos le señalan que la pasividad es la opción emocionalmente más segura.

La investigación con poblaciones infantiles ha revelado que la capacidad de utilizar marcadores somáticos para guiar decisiones experimenta un desarrollo gradual durante la infancia y la adolescencia, paralelo a la maduración de la corteza ventromedial prefrontal y sus conexiones con la amígdala y la ínsula (Happaney et al., 2004). Los niños pequeños muestran una mayor dependencia de los marcadores somáticos inmediatos la gratificación instantánea, la evitación del malestar presente y una menor capacidad para integrar marcadores asociados a consecuencias diferidas. Esto explica, en parte, por qué las estrategias pedagógicas que prometen recompensas lejanas ("si estudias ahora, tendrás buenas calificaciones al final del bimestre") resultan menos eficaces en los primeros años de educación básica que aquellas que generan retroalimentación emocional inmediata y significativa. Dumontheil et al. (2022) refuerzan este punto con datos de tareas experimentales de toma de decisiones con niños de entre seis y diez años: la respuesta galvánica de la piel un indicador fisiológico de activación emocional predecía las decisiones de los participantes con mayor precisión que sus autorreportes verbales sobre lo que consideraban la "mejor" opción. Los niños, en otras palabras, tomaban decisiones guiadas por señales corporales que no podían articular verbalmente, lo cual confirma que el sistema de marcadores somáticos opera en gran medida por debajo del umbral de la conciencia reflexiva.

La traducción pedagógica de la hipótesis del marcador somático requiere que el docente comprenda algo que puede resultar contraintuitivo para quienes operan desde un modelo racionalista del aprendizaje: no basta con que un estudiante entienda intelectualmente que una conducta académica es beneficiosa; es necesario que la experiencia repetida de esa conducta se asocie a estados corporales y emocionales positivos que configuren marcadores somáticos favorables. Un estudiante que comprende perfectamente que leer es importante pero cuya historia de lectura está poblada de experiencias de fracaso, corrección punitiva y comparación desfavorable con compañeros más hábiles, ha desarrollado marcadores somáticos negativos asociados a la actividad lectora que interfieren con su disposición a leer, independientemente de su comprensión racional del valor de la lectura. La implicación práctica es clara y exigente: los docentes necesitan diseñar experiencias de aprendizaje que generen asociaciones emocionales positivas, no a través de recompensas extrínsecas artificiales que distorsionan la valoración intrínseca de la actividad, sino mediante la calibración cuidadosa del nivel de

desafío para que se sitúe dentro de la zona de desarrollo próximo del estudiante, la provisión de retroalimentación empática que reconozca el esfuerzo y no solo el resultado, y la construcción deliberada de un entorno social donde el error se perciba como parte natural del proceso de aprendizaje y no como evidencia de incompetencia.

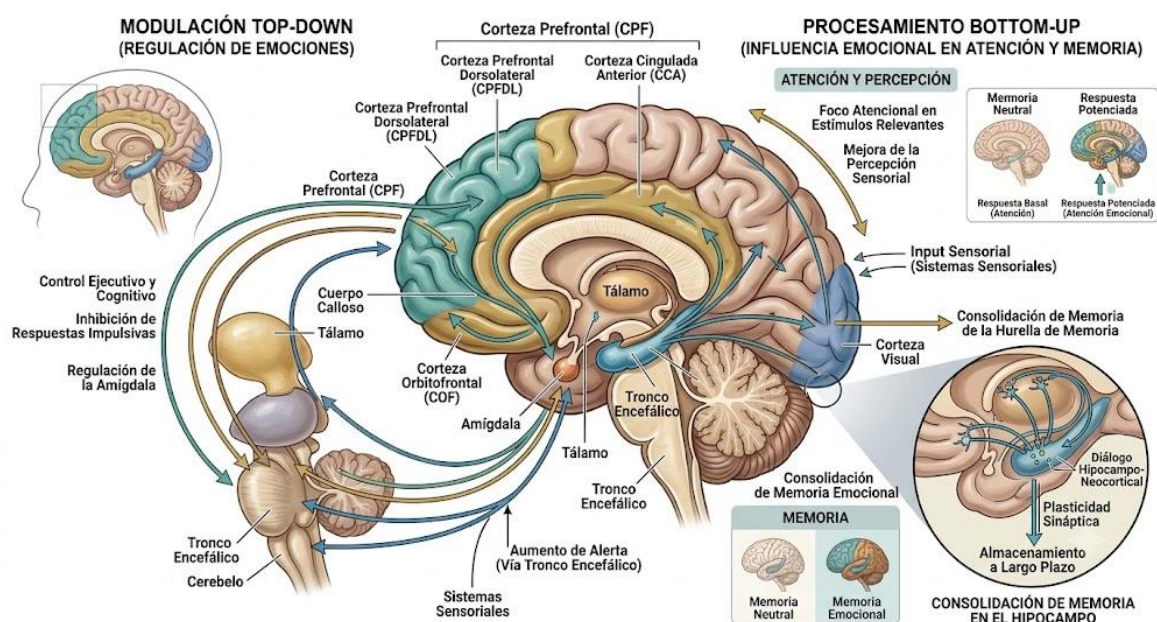
Existe, además, una dimensión temporal de los marcadores somáticos que la práctica docente debería considerar. Damasio (2010) distinguió entre marcadores somáticos primarios respuestas emocionales innatas ante ciertos estímulos biológicamente relevantes y marcadores somáticos secundarios respuestas emocionales aprendidas a través de la experiencia que se almacenan como asociaciones entre situaciones y estados corporales. Los marcadores secundarios se modifican con la experiencia, lo cual significa que un estudiante que ha desarrollado marcadores negativos asociados a cierta área del conocimiento puede, en principio, reconstruir esas asociaciones si se le proporcionan experiencias positivas consistentes y suficientemente intensas como para competir con los marcadores previos. Esta reconceptualización conecta la hipótesis del marcador somático con las nociones de plasticidad que desarrollamos en el capítulo segundo: los circuitos emocionales asociados al aprendizaje no son fijos, pero su modificación requiere tiempo, consistencia y un entorno que promueva activamente la generación de nuevas asociaciones afectivas. Una intervención pedagógica aislada, por bien diseñada que esté, rara vez será suficiente para reconfigurar marcadores somáticos consolidados por años de experiencias negativas.

#### **4.3. Emoción y cognición como procesos inseparables: evidencia desde la neuroimagen funcional sobre el aprendizaje emocionalmente significativo**

Mary Helen Immordino-Yang ha articulado con singular claridad una tesis que la neurociencia afectiva acumula en forma de evidencia convergente desde múltiples líneas de investigación: la emoción no es un complemento del aprendizaje, ni un facilitador opcional que conviene incorporar cuando sea posible; la emoción es el mecanismo mismo a través del cual el cerebro determina qué información merece ser procesada con profundidad, consolidada en la memoria a largo plazo y transferida a nuevos contextos (Immordino-Yang, 2016). Esta formulación, lejos de constituir una metáfora pedagógica inspiradora, pero imprecisa, se sustenta en hallazgos neurobiológicos robustos que demandan un examen detenido.

**Figura 23**

*Interacción bidireccional entre Emoción y Cognición*



Los estudios de neuroimagen funcional realizados durante tareas de aprendizaje han demostrado consistentemente que la activación de regiones asociadas al procesamiento emocional amígdala, corteza cingulada anterior, ínsula, corteza orbitofrontal predice la retención posterior del material aprendido con mayor precisión que la activación de regiones asociadas al procesamiento puramente semántico o perceptivo (Tyng et al., 2017). El hipocampo, estructura medial del lóbulo temporal cuya participación en la formación de memorias declarativas se analizó extensamente en el capítulo anterior, recibe proyecciones densas desde la amígdala. Cuando un estímulo activa simultáneamente la amígdala y el hipocampo, la consolidación de la memoria asociada se potencia a través de mecanismos que involucran la liberación de noradrenalina y la modulación de la potenciación a largo plazo en las sinapsis hipocampales (McGaugh, 2015). El cerebro, dicho sin más rodeos, recuerda mejor aquello que le importa emocionalmente, porque el sistema emocional interviene directamente en los procesos bioquímicos que estabilizan las huellas mnésicas. La noradrenalina liberada por el locus coeruleus bajo la influencia de la activación amigdalina actúa sobre receptores beta-adrenérgicos en el hipocampo, potenciando la consolidación sináptica de las memorias asociadas al evento emocional. Este mecanismo no es una peculiaridad del sistema nervioso humano; se ha conservado a lo largo de la evolución porque confiere una ventaja adaptativa evidente: recordar mejor aquellas experiencias que tuvieron consecuencias emocionales

significativas permite al organismo anticipar y prepararse para situaciones similares en el futuro.

Immordino-Yang y Damasio (2007) propusieron el concepto de "pensamiento emocional" para referirse a la dimensión afectiva que subyace a todo razonamiento complejo, incluyendo el razonamiento académico. Según estos autores, incluso las formas más abstractas de cognición la resolución de ecuaciones, el análisis sintáctico, la inferencia lógica se apoyan en valoraciones afectivas que orientan la atención, sostienen la motivación y señalan la relevancia de la información. Un estudio posterior del laboratorio de Immordino-Yang con adolescentes escolarizados encontró que las narrativas que evocaban emociones de admiración y compasión activaban la red neuronal por defecto, un conjunto de regiones cerebrales corteza prefrontal medial, precúneo, corteza cingulada posterior, unión temporoparietal que se activa durante la reflexión introspectiva, la planificación autobiográfica y la construcción de significado personal (Immordino-Yang et al., 2012). Este hallazgo sugiere que cuando los estudiantes experimentan emociones profundas en relación con un contenido de aprendizaje, sus cerebros transitan de un modo de procesamiento superficial centrado en las características perceptivas del estímulo a un modo de procesamiento profundo que involucra la conexión del material con la experiencia personal, los valores propios y los esquemas de significado existentes. En la terminología de la psicología educativa clásica, las emociones facilitan el tránsito del aprendizaje superficial al aprendizaje profundo; en la terminología neurocientífica, las emociones reclutan redes cerebrales adicionales que enriquecen la representación neural del material aprendido y multiplican las vías de acceso para su recuperación posterior.

Pessoa (2008) llevó esta argumentación un paso más allá al proponer que la distinción misma entre procesamiento emocional y procesamiento cognitivo carece de validez neurobiológica como categorización de sistemas cerebrales separados. Las mismas regiones que participan en el procesamiento emocional la corteza cingulada anterior, la ínsula, la corteza orbitofrontal participan también en funciones típicamente clasificadas como cognitivas: el monitoreo de conflictos, la detección de errores, la actualización de la memoria de trabajo, la asignación de recursos atencionales. La corteza cingulada anterior, por ejemplo, se activa tanto durante la experiencia de dolor emocional por exclusión social como durante la detección de incongruencias en una tarea de Stroop, lo cual sugiere que su función no es "emocional" ni "cognitiva" en un sentido exclusivo, sino que opera como un sistema de alerta que detecta discrepancias entre las expectativas del organismo y la realidad percibida, independientemente de que esas discrepancias sean de naturaleza afectiva o informacional. Esta integración funcional tiene una consecuencia pedagógica que debería transformar el modo en que

concebimos el diseño de experiencias de aprendizaje: separar artificialmente la dimensión emocional y la dimensión cognitiva de una clase como si primero hubiera que "motivar" al estudiante y luego "enseñarle" refleja una arquitectura pedagógica que no se corresponde con la arquitectura funcional del cerebro. La motivación no precede al aprendizaje; emerge del mismo proceso de aprendizaje cuando este se desarrolla en condiciones que permiten al cerebro detectar relevancia, experimentar competencia y construir significado.

Una línea de evidencia particularmente reveladora proviene de los estudios sobre el efecto de las emociones incidentales en el rendimiento cognitivo. Blanchette y Richards (2010) revisaron décadas de investigación sobre cómo los estados emocionales inducidos experimentalmente que no guardan relación directa con la tarea cognitiva en curso afectan el razonamiento, la resolución de problemas y la toma de decisiones. Sus conclusiones indican que los estados emocionales positivos moderados tienden a ampliar el foco atencional y a facilitar el pensamiento creativo y la detección de relaciones remotas entre conceptos, mientras que los estados emocionales negativos tienden a estrechar el foco atencional y a favorecer el procesamiento analítico detallado pero con mayor rigidez cognitiva. Fredrickson (2001), con su teoría de la ampliación y construcción de las emociones positivas, propuso que este efecto expansivo de las emociones positivas sobre la cognición tiene una función adaptativa acumulativa: al ampliar el repertorio de pensamiento y acción, las emociones positivas permiten construir recursos cognitivos, sociales y psicológicos duraderos que fortalecen la resiliencia del individuo ante desafíos futuros. La extrapolación al aula es directa: un estudiante que se siente seguro, valorado y emocionalmente cómodo dispone literalmente de un repertorio cognitivo más amplio para abordar los desafíos académicos que aquel que opera desde un estado emocional restrictivo dominado por la ansiedad, la vergüenza o el aburrimiento.

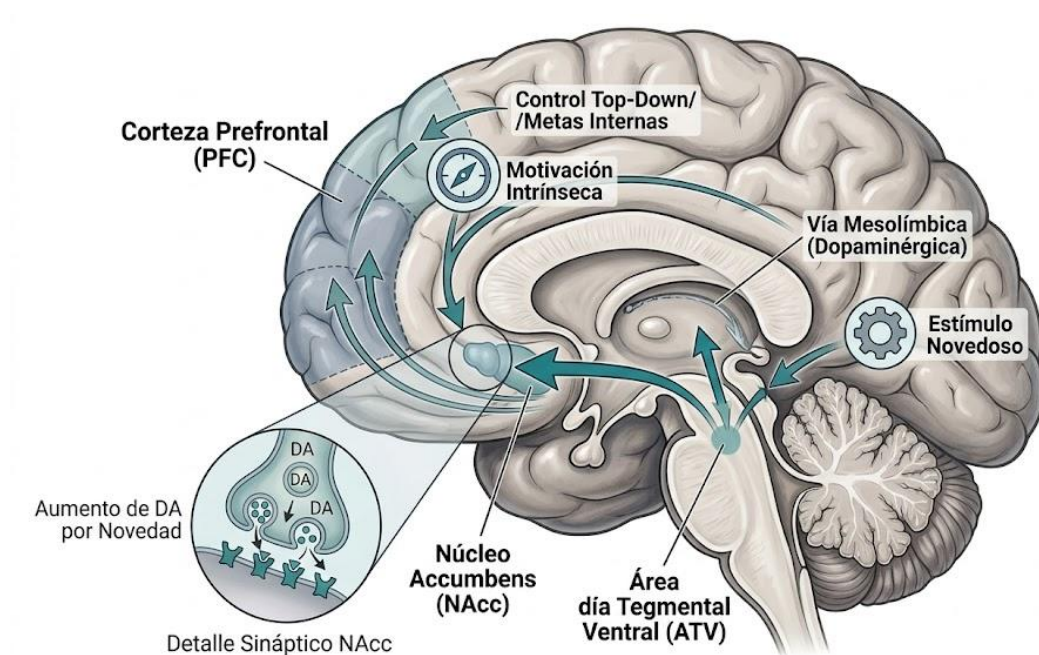
Sin embargo, la relación entre emoción y cognición no es lineal ni unidireccional, y sería un error derivar de esta evidencia la conclusión simplista de que basta con hacer que los estudiantes "se sientan bien" para que aprendan. Yerkes y Dodson documentaron hace más de un siglo la relación de U invertida entre activación y rendimiento, y la neurociencia contemporánea ha refinado esta observación mostrando que existe un nivel óptimo de activación emocional para cada tipo de tarea cognitiva: demasiada calma puede producir desenganche y procesamiento superficial, mientras que demasiada activación ya sea por excitación positiva excesiva o por ansiedad puede saturar los recursos de la memoria de trabajo y comprometer el rendimiento (Diamond, 2013). La habilidad del docente reside, en parte, en calibrar el nivel de activación emocional del aula para mantenerlo dentro de esa ventana óptima que Vygotsky conceptualizó pedagógicamente como zona de desarrollo próximo y que la

neurociencia podría reconceptualizar como zona de activación emocional compatible con el procesamiento cognitivo eficiente.

#### 4.4. Circuitos de recompensa, dopamina y motivación intrínseca: qué activa y qué apaga el deseo de aprender en el cerebro infantil

**Figura 24**

*El Circuito de Recompensa y la Dopamina*



El deseo de aprender esa inclinación que observamos en los niños pequeños cuando exploran incansablemente su entorno, formulan preguntas que los adultos no anticipan, desmontan objetos para entender su funcionamiento tiene un sustrato neurobiológico que la investigación ha ido clarificando con creciente precisión. Los circuitos de recompensa del cerebro, articulados en torno al sistema mesolímbico dopaminérgico, constituyen la maquinaria neural que genera las señales de placer, anticipación y motivación que impulsan al organismo a buscar, explorar y repetir comportamientos que han resultado gratificantes. Comprender cómo funcionan estos circuitos, cómo se desarrollan durante la infancia y cómo las prácticas pedagógicas pueden activarlos o inhibirlos, es imprescindible para cualquier docente que aspire a fomentar la motivación intrínseca por el aprendizaje.

El área tegmental ventral, un pequeño grupo de neuronas dopaminérgicas localizado en el mesencéfalo, constituye el origen principal de las proyecciones dopaminérgicas que alcanzan el núcleo accumbens en el estriado ventral y la corteza prefrontal. Cuando un organismo

encuentra algo inesperadamente gratificante o cuando anticipa una recompensa basándose en señales predictivas aprendidas, las neuronas dopaminérgicas del área tegmental ventral disparan en ráfagas fásicas que liberan dopamina en sus áreas de proyección (Schultz, 2016). Esta liberación de dopamina no codifica el placer en sí mismo, como se creyó durante décadas, sino algo más sutil y más relevante para la educación: codifica el error de predicción de recompensa, la discrepancia entre la recompensa esperada y la recompensa efectivamente obtenida. Cuando una experiencia resulta mejor de lo anticipado, la dopamina se libera masivamente; cuando resulta exactamente como se esperaba, la liberación es mínima; cuando resulta peor de lo previsto, la actividad dopaminérgica se suprime por debajo de los niveles basales.

Las implicaciones pedagógicas de este mecanismo son profundas y contraintuitivas. Si el circuito dopaminérgico responde primordialmente al error de predicción a lo inesperado, a la sorpresa positiva, a la novedad gratificante entonces las prácticas pedagógicas que resultan predecibles, rutinarias y carentes de elementos de sorpresa producen una habituación dopaminérgica que reduce progresivamente la señal motivacional. Gruber et al. (2014) demostraron experimentalmente que los estados de curiosidad que generan activación anticipatoria del sistema dopaminérgico no solo mejoran la retención del material que despertó la curiosidad, sino también la retención de material incidental presentado durante el estado de curiosidad elevada. En su estudio, los participantes que se encontraban en un estado de alta curiosidad mostraban mayor activación del hipocampo y del circuito mesolímbico dopaminérgico, y recordaban mejor tanto la información que había despertado su curiosidad como información neutra intercalada que no guardaba relación con la pregunta curiosa. La curiosidad, por tanto, no solo beneficia el aprendizaje del contenido específico que la genera, sino que crea una ventana temporal de facilitación mnésica generalizada durante la cual el cerebro se encuentra particularmente receptivo para codificar nueva información.

Li et al. (2022) han extendido estos hallazgos a poblaciones infantiles, mostrando que niños de entre ocho y once años exhiben patrones de activación del circuito de recompensa similares a los de adultos durante estados de curiosidad, pero con una sensibilidad mayor a las señales de error de predicción positivo. Los cerebros infantiles, en otras palabras, parecen estar particularmente sintonizados para responder a la novedad y la sorpresa positiva, lo cual tiene sentido desde una perspectiva evolutiva: durante el desarrollo, la exploración del entorno y el aprendizaje sobre el mundo son las tareas adaptativas primarias, y el sistema de recompensa está calibrado para incentivar precisamente esos comportamientos. El problema surge cuando las prácticas escolares, diseñadas con frecuencia para maximizar el control, la predictibilidad

y la homogeneidad, entran en conflicto con esta calibración natural del sistema de recompensa infantil. Una clase en la que el estudiante puede predecir con exactitud qué va a ocurrir en cada momento la misma secuencia de actividades, el mismo formato de tareas, las mismas consecuencias predecibles produce una habituación dopaminérgica que va erosionando gradualmente la señal motivacional, independientemente de lo valioso que sea el contenido desde una perspectiva curricular.

La distinción entre motivación intrínseca y motivación extrínseca adquiere una nueva dimensión cuando se examina desde la neurobiología del sistema de recompensa. Deci y Ryan (1985), en su teoría de la autodeterminación, propusieron que la motivación intrínseca el impulso a realizar una actividad por el placer y la satisfacción inherentes a la actividad misma depende de la satisfacción de tres necesidades psicológicas básicas: autonomía, competencia y relación. La neurociencia ha comenzado a identificar los correlatos neurales de estas necesidades. La experiencia de autonomía la percepción de que uno está eligiendo libremente una acción se asocia con una mayor activación del estriado ventral y la corteza prefrontal durante la realización de la tarea, mientras que la realización de la misma tarea bajo condiciones de control externo produce una activación reducida de estas regiones (Murayama et al., 2015). La experiencia de competencia la percepción de que uno es eficaz en la tarea que realiza activa el circuito de recompensa de manera análoga a como lo hacen las recompensas primarias, sugiriendo que el cerebro humano ha evolucionado para encontrar intrínsecamente gratificante el dominio progresivo de habilidades y el logro de objetivos desafiantes pero alcanzables.

Un fenómeno particularmente inquietante desde la perspectiva educativa es el llamado efecto de socavamiento de la motivación intrínseca por las recompensas extrínsecas, documentado originalmente por Lepper et al. (1973) y confirmado por múltiples estudios subsiguientes. Cuando se ofrece una recompensa externa contingente estrellas, premios, calificaciones numéricas por una actividad que el individuo ya realiza por interés propio, la motivación intrínseca por esa actividad tiende a disminuir una vez que se retira la recompensa. Murayama et al. (2010) identificaron el correlato neural de este efecto: la introducción de recompensas extrínsecas reduce la activación del estriado ventral durante la realización de la tarea sin recompensa, como si el sistema de recompensa "aprendiera" que la actividad no es valiosa en sí misma sino como medio para obtener la recompensa externa. Cuando la recompensa desaparece, la señal dopaminérgica de error de predicción negativo la expectativa de recompensa frustrada genera una aversión activa hacia la tarea que previamente resultaba intrínsecamente motivante. Wirth et al. (2023) han documentado este efecto en contextos escolares reales con niños de educación básica, mostrando que los sistemas de incentivos

basados en recompensas tangibles pueden aumentar transitoriamente la conducta deseada pero erosionar la motivación a largo plazo cuando esas recompensas se retiran o se vuelven predecibles.

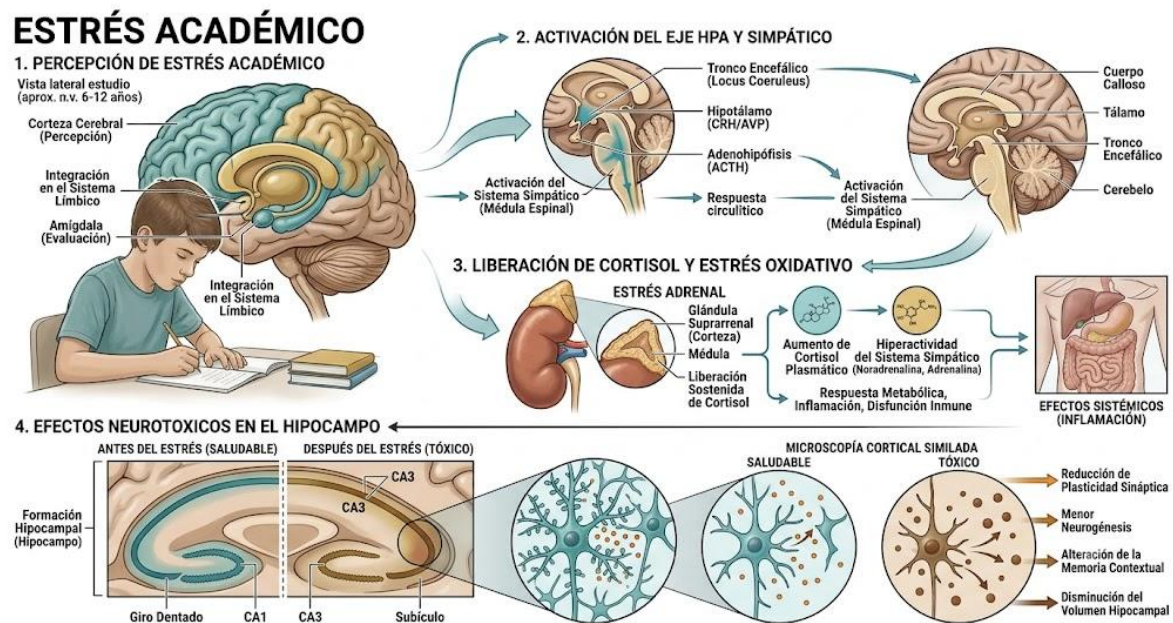
La dopamina, sin embargo, no es la única molécula relevante para la motivación en el aula. La oxitocina, liberada durante las interacciones sociales positivas, modula la actividad del circuito de recompensa y potencia la señal dopaminérgica asociada al aprendizaje social (Shamay-Tsoory y Abu-Akel, 2016). La serotonina, por su parte, participa en la regulación del estado de ánimo y en la modulación de la impulsividad, influyendo sobre la capacidad del estudiante para tolerar la demora de la gratificación que muchas tareas académicas requieren. Los endocannabinoides endógenos, cuyo papel en la modulación del aprendizaje y la memoria se ha clarificado en los últimos años, participan en la extinción de memorias emocionales negativas y en la regulación de la respuesta al estrés (Lutz et al., 2015). La imagen que emerge es la de un sistema neuroquímico complejo y finamente calibrado, que la práctica pedagógica puede modular positiva o negativamente a través de las experiencias que genera en los estudiantes, los patrones de retroalimentación que ofrece y el clima emocional que configura.

¿Qué activa, entonces, el deseo de aprender en el cerebro infantil? La convergencia de la evidencia apunta hacia cuatro condiciones neurobiológicamente fundamentadas: la novedad que genera errores de predicción positivos y activa la respuesta dopaminérgica, el desafío calibrado que permite la experiencia de competencia progresiva sin provocar frustración paralizante, la relevancia personal que recluta las redes de procesamiento profundo asociadas a la construcción de significado y la conexión social que potencia la señal motivacional a través de mecanismos oxitocinérgicos y de aprendizaje social. ¿Qué la apaga? La predictibilidad excesiva, el control coercitivo que anula la autonomía, la desconexión entre el contenido y la experiencia personal del estudiante, la amenaza social que activa los circuitos de evitación, y el uso sistemático de recompensas extrínsecas que erosionan la valoración intrínseca de la actividad de aprender. El docente que comprende estos mecanismos dispone de un marco conceptual para tomar decisiones pedagógicas informadas que trascienden las prescripciones metodológicas genéricas y se fundamentan en la comprensión de cómo el cerebro del niño genera y sostiene la motivación.

#### 4.5. El estrés académico y su impacto sobre el eje hipotalámico-hipofisario-adrenal: cortisol, memoria y rendimiento escolar

**Figura 25**

*El Eje Hipotalámico-Hipofisario-Adrenal (HHA) y el Estrés*



Existe un nivel de estrés que facilita el aprendizaje el estrés moderado, anticipatorio, que activa los recursos cognitivos y focaliza la atención y otro que lo compromete severamente. La distinción entre ambos tiene una base neurobiológica precisa que involucra al eje hipotalámico-hipofisario-adrenal, una cascada neuroendocrina que constituye el principal sistema de respuesta al estrés en los mamíferos y cuyo funcionamiento tiene consecuencias directas sobre la capacidad de aprender, recordar y pensar con flexibilidad.

Cuando el cerebro detecta una amenaza real o percibida, física o psicosocial, el hipotálamo libera hormona liberadora de corticotropina que actúa sobre la hipófisis anterior, la cual a su vez libera hormona adrenocorticotrópica al torrente sanguíneo. Esta hormona viaja hasta la corteza suprarrenal, donde estimula la síntesis y liberación de cortisol, el principal glucocorticoide en humanos (Lupien et al., 2009). El cortisol ejerce efectos amplios sobre el metabolismo energético, el sistema inmunológico y, lo que más nos interesa aquí, sobre el funcionamiento cerebral. El hipocampo, la corteza prefrontal y la amígdala son particularmente sensibles al cortisol porque poseen una alta densidad de receptores para glucocorticoides, y la respuesta de cada estructura difiere de formas que tienen consecuencias cognitivas específicas.

La relación entre cortisol y funcionamiento hipocampal sigue una función de U invertida que Lupien et al. (2007) han documentado extensamente. Niveles moderados de cortisol asociados a estrés leve o anticipatorio potencian la consolidación de memorias en el hipocampo, probablemente porque el cortisol facilita la potenciación a largo plazo sináptica en rangos de concentración moderados. Niveles elevados de cortisol sostenidos en el tiempo asociados a estrés crónico o a amenazas percibidas de alta intensidad ejercen el efecto opuesto: comprometen la potenciación a largo plazo, interfieren con la recuperación de memorias previamente consolidadas y, cuando la exposición es prolongada, pueden producir daño estructural en las neuronas hipocampales mediante mecanismos excitotóxicos que involucran al glutamato (Sapolsky, 2003). Un estudiante sometido a estrés crónico por dificultades familiares, acoso escolar, presión académica excesiva, inseguridad alimentaria o cualquier otra fuente sostenida de amenaza no solo está "preocupado" o "distráido"; está operando con un hipocampo funcionalmente comprometido por los efectos del cortisol, lo cual limita directamente su capacidad para formar nuevas memorias declarativas y recuperar información previamente aprendida.

La corteza prefrontal resulta igualmente vulnerable a los efectos del cortisol elevado, pero con consecuencias funcionales diferentes. Arnsten (2009) ha documentado que el estrés agudo intenso produce una desconexión funcional de la corteza prefrontal dorsolateral la región que soporta la memoria de trabajo, la planificación, la inhibición de respuestas impulsivas y el razonamiento flexible, trasladando el control conductual hacia estructuras subcorticales más primitivas como la amígdala y el estriado dorsal, que generan respuestas más rápidas pero menos flexibles y reflexivas. En términos coloquiales, el estrés intenso "apaga" la corteza prefrontal y "enciende" la amígdala, produciendo un modo de funcionamiento cerebral dominado por respuestas automáticas de lucha, huida o congelamiento que resultan adaptativas ante amenazas físicas inmediatas pero profundamente disfuncionales en el contexto de una tarea académica que requiere pensamiento reflexivo, creatividad y flexibilidad cognitiva. Cuando un docente observa que un estudiante "se bloquea" ante un examen, que "se queda en blanco" frente a una pregunta que debería saber contestar, que reacciona con agresividad o retraimiento ante una corrección, puede estar presenciando los efectos de esta desconexión prefrontal mediada por el cortisol.

La amígdala, paradójicamente, exhibe una respuesta opuesta a la de la corteza prefrontal y el hipocampo bajo condiciones de estrés elevado: su actividad se potencia, volviéndose hiperreactiva a los estímulos amenazantes y generando un sesgo atencional hacia la información negativa que dificulta el procesamiento de información neutra o positiva (van

Marle et al., 2009). Un estudiante estresado no solo tiene comprometida su capacidad de memoria y su flexibilidad cognitiva; además, su sistema atencional está sesgado hacia la detección de amenazas, lo cual significa que percibe con mayor probabilidad señales de peligro social una mirada del docente, un murmullo de compañeros, una instrucción ambigua interpretándolas en clave negativa incluso cuando su contenido real es neutro o positivo. Este sesgo interpretativo amplifica la experiencia de estrés en un ciclo de retroalimentación positiva que puede cronificarse si no se interviene adecuadamente.

La investigación sobre estrés académico en poblaciones infantiles latinoamericanas ha aportado datos que merecen atención específica. Maldonado et al. (2022) documentaron niveles de cortisol salival significativamente elevados en estudiantes de educación básica durante semanas de evaluaciones estandarizadas, con valores que se normalizaban únicamente después de períodos de descanso de al menos dos semanas sin evaluaciones. García-Pérez et al. (2023) encontraron que los estudiantes de estratos socioeconómicos bajos presentaban perfiles de cortisol diurno alterados con una menor pendiente matutina y niveles vespertinos más elevados que se asociaban con un menor rendimiento en tareas de memoria de trabajo y flexibilidad cognitiva. Estos hallazgos convergen con la investigación sobre los efectos del estrés tóxico documentada por Shonkoff et al. (2012) en el contexto del marco conceptual del Centro para el Niño en Desarrollo de la Universidad de Harvard: cuando el estrés es severo, prolongado y carece de la amortiguación proporcionada por relaciones de apoyo con adultos cuidadores, produce alteraciones duraderas en la arquitectura de los circuitos cerebrales en desarrollo, con efectos particularmente pronunciados sobre la corteza prefrontal y el hipocampo.

Distinguir entre tres tipos de respuesta al estrés resulta clarificador para el docente. El estrés positivo, caracterizado por elevaciones breves de cortisol y activación simpática moderada, ocurre cuando el niño enfrenta un desafío manejable en presencia de un adulto que le brinda apoyo el primer día de clases, una exposición oral preparada, un examen para el cual se ha estudiado. Este tipo de estrés promueve el desarrollo de la resiliencia y la autoeficacia. El estrés tolerable implica una activación más intensa de los sistemas de respuesta al estrés, pero se amortigua gracias a la presencia de relaciones de apoyo que ayudan al niño a procesar la experiencia y a retornar a la homeostasis una mudanza familiar, la enfermedad de un ser querido, un conflicto significativo con pares. El estrés tóxico, la tercera categoría, se produce cuando la activación del sistema de estrés es intensa, prolongada y no cuenta con amortiguación relacional adecuada maltrato, negligencia crónica, exposición a violencia, pobreza extrema sostenida. Las prácticas pedagógicas pueden contribuir a que el estrés académico se mantenga en la categoría de estrés positivo o, si no se manejan adecuadamente, pueden empujar a

estudiantes vulnerables hacia el territorio del estrés tolerable o incluso del estrés tóxico cuando se suman a otras fuentes de adversidad en la vida del niño.

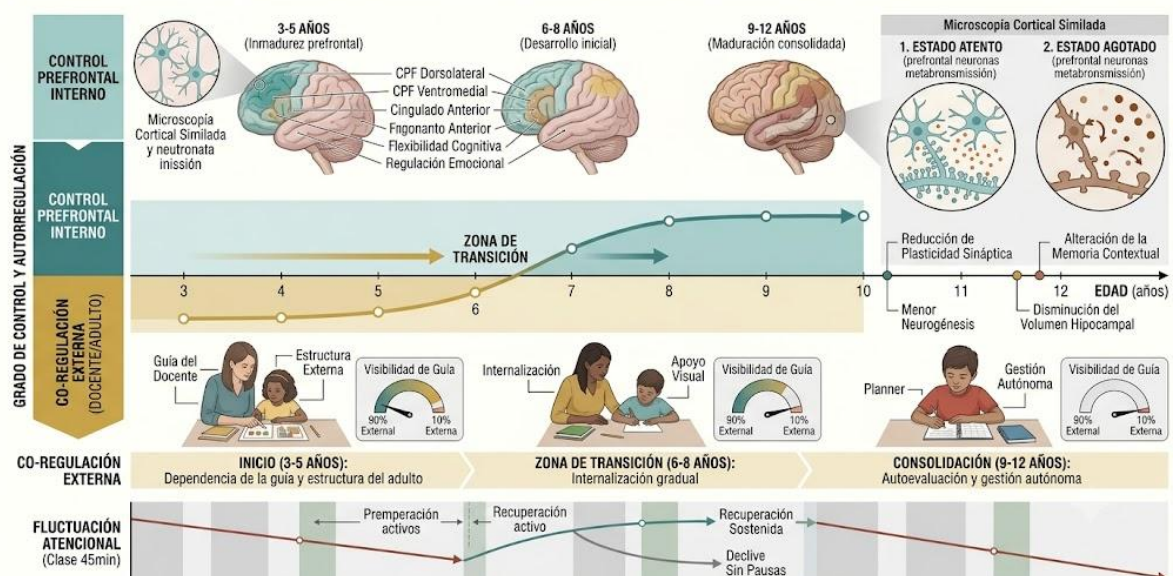
La evaluación educativa merece una mención específica por su capacidad de generar respuestas de estrés que interfieren con el rendimiento que pretende medir. Vogel y Schwabe (2016) demostraron que la exposición a un estresor social antes de una prueba de memoria el paradigma de estrés social de Trier, adaptado para adolescentes producía un deterioro significativo en la recuperación de información previamente consolidada, mediado por la elevación de cortisol y su efecto inhibitorio sobre el hipocampo. Este hallazgo plantea una paradoja incómoda para los sistemas educativos que dependen de evaluaciones de alto riesgo: el estrés que genera la situación evaluativa puede comprometer la expresión del aprendizaje real del estudiante, haciendo que la evaluación mida tanto el conocimiento como la resistencia al estrés, contaminando la validez de la medición. Un estudiante que sabe el contenido pero que experimenta niveles elevados de ansiedad evaluativa puede obtener calificaciones que subestiman sistemáticamente su aprendizaje real, generando un marcador somático negativo adicional que alimenta un ciclo de ansiedad-bajo rendimiento-más ansiedad que se retroalimenta con cada experiencia evaluativa.

#### 4.6. Regulación emocional en la infancia: desarrollo de la capacidad autorregulatoria y su relación con el clima de aula

**Figura 26**

*Traectoria de desarrollo de la Regulación Emocional*

##### EVOLUCIÓN DE LA AUTORREGULACIÓN: DE LA CO-REGULACIÓN EXTERNA AL CONTROL PREFRONTAL INTERNO (3-12 AÑOS)



La capacidad de regular las propias emociones modular su intensidad, cambiar su valencia, postergar la expresión emocional impulsiva cuando las circunstancias lo requieren no es una habilidad que los niños posean de forma innata, sino un logro del desarrollo que depende de la maduración cerebral, de la experiencia relacional y del andamiaje proporcionado por los adultos significativos en la vida del niño. La regulación emocional constituye, probablemente, la competencia más determinante para el éxito académico y social en educación básica, superando en poder predictivo al coeficiente intelectual, al nivel socioeconómico y a la calidad de la instrucción recibida (Blair y Raver, 2015).

Gross (1998) propuso un modelo procesual de la regulación emocional que distingue varias estrategias según el punto del proceso emocional en el que intervienen. La selección de la situación y la modificación de la situación operan antes de que la emoción se genere, alterando el contexto que la desencadena. El despliegue atencional dirigir la atención hacia o lejos de los aspectos emocionalmente activadores de una situación opera durante la percepción del estímulo. El cambio cognitivo reinterpretar el significado de una situación para alterar su impacto emocional opera durante la evaluación cognitiva. La modulación de la respuesta suprimir o modificar la expresión emocional una vez que la emoción ya se ha generado opera en la fase de respuesta. Desde la neurociencia, estas estrategias reclutan circuitos cerebrales parcialmente diferenciados. Ochsner y Gross (2005) documentaron que la reevaluación cognitiva una forma de cambio cognitivo que consiste en reinterpretar una situación emocionalmente activadora para reducir su impacto activa la corteza prefrontal dorsolateral y la corteza prefrontal ventrolateral, que ejercen una modulación descendente sobre la actividad de la amígdala, reduciendo la intensidad de la respuesta emocional. La supresión expresiva, en cambio, no reduce la activación amigdalina y se asocia con un costo cognitivo mayor porque consume recursos de la memoria de trabajo sin modificar la experiencia emocional subyacente (Goldin et al., 2008).

La investigación del desarrollo ha trazado una trayectoria madurativa de la regulación emocional que refleja la maduración gradual de la corteza prefrontal y sus conexiones con las estructuras límbicas. Los bebés dependen casi enteramente de la correulación proporcionada por los cuidadores: el adulto modula el estado emocional del niño a través del contacto físico, la voz, la mirada y la contingencia de sus respuestas. Durante los años preescolares, los niños comienzan a utilizar estrategias simples de regulación autónoma autodistraerse, buscar consuelo en un objeto, alejarse físicamente de la fuente de malestar, pero su capacidad de reevaluación cognitiva es limitada porque las regiones prefrontales que la soportan están aún en desarrollo (Silvers et al., 2012). En la etapa de educación básica, entre los seis y los doce

años, se observa un incremento progresivo en la capacidad de utilizar estrategias de regulación más sofisticadas, incluyendo la reevaluación cognitiva, pero esta capacidad sigue siendo frágil y susceptible de colapsar bajo condiciones de estrés elevado, fatiga o demandas cognitivas concurrentes. Silvers et al. (2017) documentaron que los niños de ocho años podían utilizar instrucciones de reevaluación cognitiva para reducir su respuesta emocional a imágenes negativas, pero que la eficacia de esta estrategia se reducía significativamente cuando se les pedía simultáneamente que mantuvieran información en la memoria de trabajo, revelando la competencia entre las demandas cognitivas de la regulación emocional y las demandas cognitivas de la tarea académica. Para un niño de tercer grado que está intentando resolver un problema matemático difícil y al mismo tiempo regulando la frustración que le genera no poder resolverlo, ambas tareas compiten por los mismos recursos prefrontales limitados, lo cual explica por qué la regulación emocional frecuentemente falla precisamente en los momentos en que más se necesita.

Esta comprensión tiene implicaciones directas para el diseño del clima de aula. Si la regulación emocional de los niños es una capacidad en desarrollo, frágil y costosa en términos de recursos cognitivos, entonces el entorno de aprendizaje debe minimizar las demandas de regulación innecesarias para liberar recursos cognitivos que puedan dedicarse al aprendizaje. Un aula donde las reglas son claras y predecibles, donde el docente gestiona los conflictos con calma y justicia, donde las transiciones entre actividades son suaves, donde el error se trata con normalidad y no con dramatismo, es un aula que reduce la carga de regulación emocional para los estudiantes y libera recursos prefrontales para el procesamiento cognitivo. Inversamente, un aula donde las reglas son arbitrarias o inconsistentes, donde el docente reacciona emocionalmente de forma impredecible, donde las transiciones son abruptas y caóticas, donde el error se castiga o se ridiculiza, impone una carga regulatoria constante que consume los recursos cognitivos necesarios para aprender.

La corregulación docente-estudiante representa un concepto que merece desarrollo específico. Así como los padres y cuidadores funcionan como reguladores emocionales externos para los niños pequeños, el docente cumple una función análoga en el entorno escolar, particularmente durante la educación básica (Eisenberg et al., 2010). El tono de voz del docente, su expresión facial, su postura corporal, la cadencia de su discurso y la contingencia de sus respuestas ante las expresiones emocionales de los estudiantes constituyen señales que el cerebro infantil utiliza para calibrar su propio estado emocional. Las neuronas espejo y los mecanismos de contagio emocional, mediados por circuitos que involucran la ínsula anterior y la corteza cingulada anterior, permiten que los estados emocionales del docente se transmitan

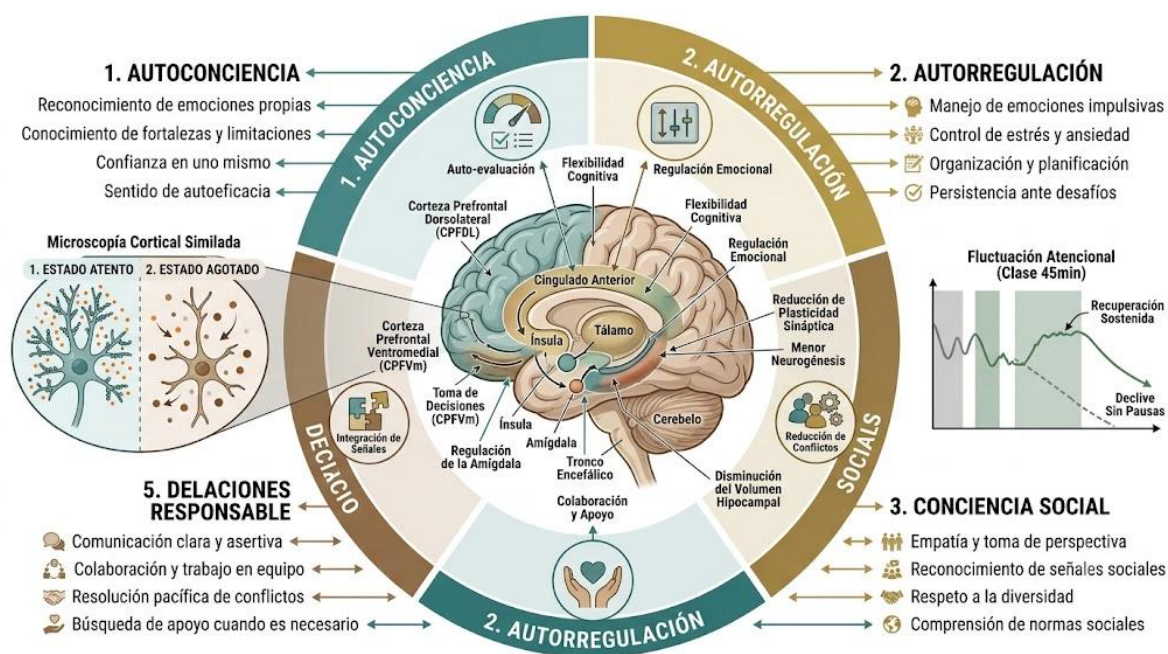
a los estudiantes a través de mecanismos automáticos que operan por debajo de la conciencia explícita (Hatfield et al., 2014). Un docente que entra al aula tranquilo, que responde a las interrupciones con firmeza, pero sin hostilidad, que modela la regulación emocional ante la frustración y el error, está proporcionando un andamiaje regulatorio que literalmente ayuda a los cerebros de sus estudiantes a mantener un estado emocional compatible con el aprendizaje. Por el contrario, un docente que transmite ansiedad, irritabilidad o descontrol emocional está generando una cascada de contagio emocional que incrementa la carga regulatoria de todos los estudiantes del aula, con efectos particularmente pronunciados en aquellos que ya llegan con recursos regulatorios limitados.

Calkins y Perry (2016) han propuesto que el desarrollo de la regulación emocional en la infancia depende de la interacción entre tres factores: la maduración neurobiológica de los circuitos prefrontales, la calidad de las relaciones de apego con adultos significativos y las oportunidades de práctica regulatoria que ofrece el entorno. El aula de educación básica constituye un entorno privilegiado para los dos últimos factores: ofrece una relación con un adulto significativo el docente que puede funcionar como base de seguridad emocional, y proporciona oportunidades diarias de práctica regulatoria en contextos sociales naturales. El desafío reside en que muchos docentes no han recibido formación específica sobre regulación emocional infantil y aplican intuitivamente estrategias que pueden resultar contraproducentes desde la perspectiva neurocientífica. Pedirle a un niño emocionalmente activado que "se calme" sin proporcionarle herramientas concretas para hacerlo, separarlo del grupo como castigo por una expresión emocional que aún no ha aprendido a regular, exigirle que explique verbalmente sus emociones cuando su corteza prefrontal está funcionalmente desconectada por el estrés: todas estas prácticas, bienintencionadas en muchos casos, reflejan una incomprensión del funcionamiento neurocognitivo de la regulación emocional infantil.

## 4.7. Aprendizaje socioemocional con base neurocientífica: programas, evidencia de eficacia y criterios de implementación en educación básica

**Figura 27**

*Componentes del Aprendizaje Socioemocional (SEL)*



La traducción de la neurociencia afectiva en programas educativos estructurados ha experimentado una expansión notable durante las últimas dos décadas, aunque la calidad y la fundamentación científica de esos programas varía considerablemente. El campo del aprendizaje socioemocional, popularizado por la organización CASEL (Collaborative for Academic, Social, and Emotional Learning), se ha consolidado como un marco organizador para las intervenciones que buscan desarrollar competencias emocionales y sociales en el contexto escolar, pero no todos los programas que se autodenominan socioemocionales cuentan con una base neurocientífica sólida ni con evidencia empírica de eficacia que satisfaga los estándares de la investigación rigurosa.

El marco CASEL identifica cinco competencias centrales del aprendizaje socioemocional: autoconciencia, autogestión, conciencia social, habilidades de relación y toma de decisiones responsable (CASEL, 2020). Desde la perspectiva neurocientífica, cada una de estas competencias tiene correlatos neurales identificables y trayectorias de desarrollo documentadas. La autoconciencia emocional depende de la integración interoceptiva mediada por la ínsula y de la capacidad metacognitiva sostenida por la corteza prefrontal medial. La autogestión que incluye la regulación emocional, el control de impulsos y el establecimiento

de metas recluta circuitos prefrontales dorsolaterales y ventrolaterales que maduran gradualmente durante la infancia y la adolescencia. La conciencia social la capacidad de tomar perspectiva y comprender las emociones de los otros involucra la unión temporoparietal y la red de mentalización, estructuras que también siguen una trayectoria de desarrollo prolongada (Schurz et al., 2014). Las habilidades de relación dependen de la integración entre los circuitos de cognición social, los sistemas de recompensa activados por las interacciones sociales positivas y las capacidades de regulación emocional ya descritas. La toma de decisiones responsable requiere la coordinación entre la corteza orbitofrontal, el sistema de marcadores somáticos y las funciones ejecutivas superiores.

El metaanálisis seminal de Durlak et al. (2011), que incluyó 213 estudios con más de 270.000 estudiantes, encontró que los programas de aprendizaje socioemocional producían mejoras significativas en habilidades socioemocionales, actitudes hacia la escuela y el aprendizaje, comportamiento prosocial y rendimiento académico, con un tamaño del efecto promedio de 0.31 desviaciones estándar en rendimiento académico, lo cual equivale aproximadamente a un avance de once percentiles. Un aspecto notable de este metaanálisis fue el hallazgo de que los programas más eficaces compartían cuatro características que los autores sintetizaron en el acrónimo SAFE: eran secuenciados (presentaban las habilidades de forma graduada y progresiva), activos (utilizaban formas de aprendizaje experiencial), focalizados (dedicaban tiempo suficiente a la práctica de las habilidades específicas) y explícitos (definían con claridad las habilidades que pretendían desarrollar). Los programas que carecían de alguna de estas características mostraban efectos significativamente menores.

Taylor et al. (2017) extendieron el análisis de Durlak et al. examinando la persistencia de los efectos de los programas socioemocionales a largo plazo, mediante un metaanálisis de estudios con seguimiento de al menos seis meses. Los resultados mostraron que los beneficios se mantenían en el tiempo, con efectos persistentes sobre el rendimiento académico, la conducta prosocial y la reducción de problemas emocionales y conductuales. Schonert-Reichl (2017) ha argumentado que estos efectos persistentes son congruentes con lo que la neurociencia predice: las intervenciones que desarrollan competencias de regulación emocional durante períodos sensibles del desarrollo prefrontal pueden producir cambios duraderos en la arquitectura funcional de los circuitos regulatorios, especialmente si las intervenciones son consistentes y se sostienen en el tiempo.

Entre los programas con mayor evidencia de eficacia y con una fundamentación neurocientífica más explícita, varios merecen mención. El programa RULER, desarrollado por Brackett (2019) en la Universidad de Yale, se estructura en torno a cinco competencias

emocionales reconocer, comprender, etiquetar, expresar y regular emociones que se corresponden con procesos neurocognitivos específicos: la integración interoceptiva insular para el reconocimiento, la mentalización para la comprensión, el procesamiento lingüístico para el etiquetado, la coordinación entre sistemas motores y emocionales para la expresión, y la modulación prefrontal descendente para la regulación. Brackett et al. (2019) han documentado que la implementación del programa RULER en escuelas produce mejoras en el clima emocional del aula, medido mediante observación sistemática, y en el rendimiento académico de los estudiantes, con efectos más pronunciados en escuelas que implementan el programa con fidelidad alta durante al menos dos años consecutivos.

MindUP, un programa basado en prácticas de atención plena adaptadas para niños, incorpora explícitamente contenido neurocientífico en su currículo: los estudiantes aprenden sobre las funciones de la amígdala, la corteza prefrontal y el hipocampo como parte del programa, lo cual les proporciona un vocabulario neurocientífico para comprender sus propias experiencias emocionales (Schonert-Reichl et al., 2015). Maloney et al. (2016) encontraron que los estudiantes que participaron en MindUP mostraban mejoras en autoinforme de bienestar, en conducta prosocial evaluada por pares y en funciones ejecutivas medidas mediante tareas computarizadas, con efectos moderados que se mantenían al seguimiento de tres meses.

La implementación de programas socioemocionales en contextos latinoamericanos presenta desafíos específicos que la investigación ha comenzado a abordar. Berger et al. (2014) documentaron la adaptación e implementación de un programa de aprendizaje socioemocional en escuelas chilenas, encontrando que la eficacia del programa dependía críticamente de la formación y el acompañamiento recibido por los docentes implementadores, así como del apoyo institucional proporcionado por los equipos directivos. Lecannelier et al. (2021) han desarrollado programas de intervención basados en el modelo de apego y regulación emocional específicamente diseñados para contextos de alta vulnerabilidad social en Chile, con resultados prometedores sobre la reducción de problemas conductuales y emocionales en niños de educación básica. Estos trabajos subrayan un punto que la investigación anglosajona a veces pasa por alto: los programas socioemocionales no se transfieren de un contexto cultural a otro sin adaptación, y las variables contextuales la formación docente, los recursos institucionales, las concepciones culturales sobre las emociones, las condiciones de adversidad social modulan significativamente la eficacia de las intervenciones.

La neurociencia aporta criterios específicos para evaluar la calidad de los programas socioemocionales más allá de sus marcos teóricos y sus resultados empíricos agregados. Un

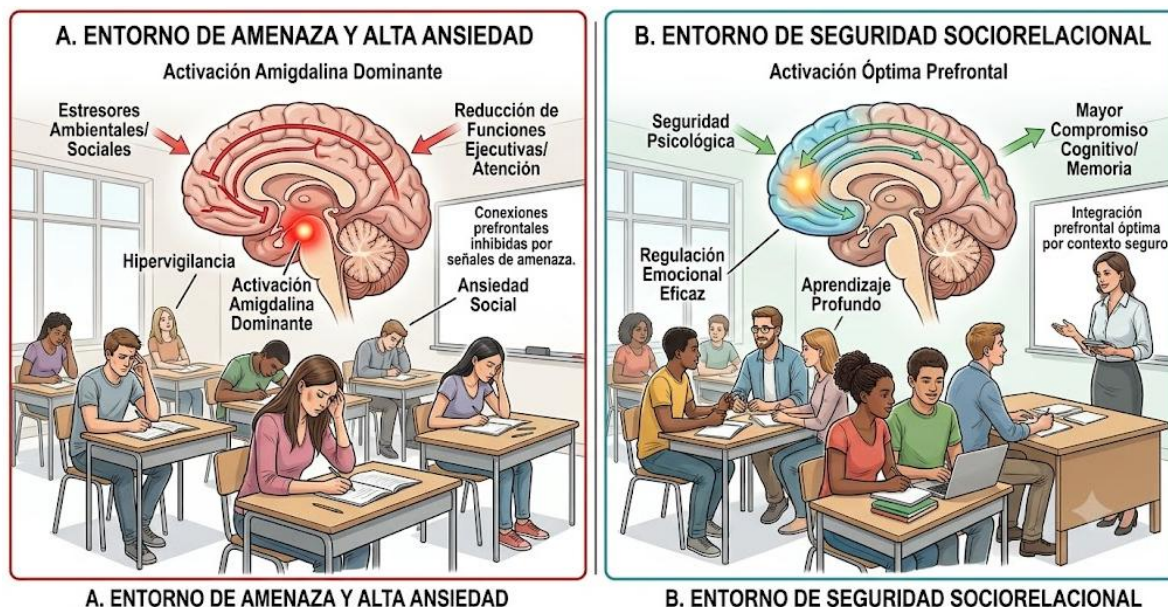
programa fundamentado neurocientíficamente debería respetar las trayectorias de desarrollo de las competencias que pretende desarrollar, ajustando la complejidad de las habilidades enseñadas a la maduración de los circuitos cerebrales que las soportan. No tiene sentido enseñar reevaluación cognitiva sofisticada a niños de primer grado cuya corteza prefrontal aún no sostiene esta estrategia de forma autónoma; en cambio, sí tiene sentido enseñarles estrategias de regulación más simples la respiración diafragmática, el retiro voluntario a un espacio de calma, la identificación básica de emociones que son compatibles con su nivel de desarrollo neurobiológico. Un programa sólido debería, además, incorporar la práctica repetida de las habilidades en contextos variados, porque la consolidación de nuevos patrones de regulación emocional requiere la estabilización de conexiones sinápticas entre la corteza prefrontal y las estructuras límbicas, un proceso que depende de la práctica distribuida a lo largo del tiempo y no de intervenciones puntuales e intensivas (Davidson y McEwen, 2012).

Otro criterio neurobiológicamente informado concierne a la integración del aprendizaje socioemocional con el currículo académico, frente a su tratamiento como un programa aislado que se implementa en "la hora de las emociones". La evidencia de que emoción y cognición son procesos neuronalmente integrados sugiere que las competencias socioemocionales se desarrollan más eficazmente cuando se practican en el contexto de actividades académicas reales durante la resolución colaborativa de problemas, durante la discusión sobre textos literarios que exploran dilemas morales, durante los proyectos de investigación que requieren gestión de la frustración y trabajo en equipo que cuando se enseñan como contenido separado del resto del currículo. Jones y Kahn (2017) han documentado que los programas que integran las habilidades socioemocionales transversalmente en las materias académicas producen efectos más duraderos y más transferibles que aquellos que las enseñan de forma aislada, probablemente porque la integración genera conexiones neurales más ricas y diversificadas entre los circuitos emocionales y los circuitos cognitivos involucrados en el aprendizaje académico.

#### 4.8. Un aula que entiende las emociones es un aula que posibilita el aprendizaje profundo

**Figura 28**

*El Clima de Aula Neurocompatible*



El recorrido trazado a lo largo de este capítulo conduce a una conclusión que, pese a su aparente simplicidad, exige una reconfiguración profunda de las prácticas pedagógicas dominantes: las emociones no son ruido que interfiere con la señal cognitiva del aprendizaje; son parte constitutiva de esa señal. La amígdala que detecta relevancia, la corteza orbitofrontal que valora opciones, la ínsula que integra señales corporales, los circuitos dopaminérgicos que generan motivación, el eje hipotalámico-hipofisario-adrenal que modula la respuesta al estrés, las redes prefrontales que soportan la regulación emocional: todos estos sistemas participan activamente en los procesos que la educación pretende fomentar atender, comprender, recordar, aplicar, crear, colaborar y lo hacen no como acompañantes secundarios sino como componentes funcionales imprescindibles.

Para el docente de educación básica, esta comprensión implica asumir que cada decisión pedagógica tiene una dimensión emocional que afecta al aprendizaje. La manera en que se presenta una tarea activa o desactiva los circuitos de curiosidad y recompensa. El tipo de retroalimentación que se ofrece configura marcadores somáticos que facilitarán o dificultarán el acercamiento futuro del estudiante a tareas similares. El nivel de estrés que genera el entorno evaluativo modula directamente la capacidad del hipocampo para consolidar y recuperar memorias. El clima emocional del aula determina cuántos recursos prefrontales quedan

disponibles para el procesamiento cognitivo después de cubrir las demandas de regulación emocional. La calidad de la relación docente-estudiante funciona como un regulador emocional externo que puede amortiguar o amplificar la vulnerabilidad de los niños al estrés.

Un aula neurocompatible, desde la perspectiva emocional, no es un aula donde se eliminan las emociones difíciles ni donde se busca que los estudiantes estén permanentemente contentos. Es un aula donde las emociones se reconocen como información legítima sobre la experiencia del aprendiz, donde se proporcionan herramientas concretas para gestionarlas, donde el nivel de desafío se calibra para generar activación óptima sin provocar estrés tóxico, donde la retroalimentación fortalece la autoeficacia en lugar de erosionarla, y donde las relaciones interpersonales proporcionan la seguridad emocional necesaria para que los niños se arriesguen a aprender. La evidencia revisada sugiere, con considerable contundencia, que esta configuración emocional del aula no es un lujo pedagógico ni un complemento deseable: es una condición necesaria para que el cerebro infantil funcione en el modo de procesamiento que permite el aprendizaje profundo, la memoria duradera y la transferencia flexible del conocimiento.

El capítulo siguiente abordará cómo estas bases neuroemocionales del aprendizaje se traducen en estrategias didácticas concretas para dos dominios curriculares centrales de la educación básica la lectoescritura y el pensamiento lógico-matemático, examinando la evidencia neurocientífica que fundamenta las metodologías de enseñanza más eficaces para cada uno de estos aprendizajes y proponiendo orientaciones que integren la dimensión emocional en el diseño instruccional cotidiano.

# **CAPÍTULO 5**

**Estrategias neurodidácticas para la enseñanza de la lectoescritura y el pensamiento  
lógico-matemático**

## Introducción

Aprender a leer y aprender a calcular son, probablemente, las dos hazañas cognitivas más exigentes que se le piden a un cerebro infantil durante los primeros años de escolaridad formal. Ninguna de las dos tiene un circuito neural dedicado desde el nacimiento; ambas se apoyan en la reutilización de redes corticales que la evolución diseñó para otros propósitos, y ambas dependen de una instrucción explícita sin la cual la mayoría de los niños no lograrían apropiarse del código escrito ni del razonamiento aritmético con la precisión que la cultura demanda. Que millones de niños aprendan a leer y a operar con cantidades cada año no debería ocultar lo extraordinario del proceso: un órgano de apenas 1 400 gramos, moldeado por presiones selectivas ajenas a la escritura y a las matemáticas formales, reconfigura parte de su arquitectura funcional para acomodar inventos culturales que apenas tienen unos pocos miles de años de historia.

Este capítulo examina los mecanismos neurocognitivos que hacen posible ese doble aprendizaje y traduce la evidencia disponible en orientaciones didácticas concretas para el profesorado de educación básica. La exposición recorre primero los circuitos de la lectura y después los de la cognición numérica, no porque sean independientes comparten recursos atencionales, de memoria de trabajo y de funciones ejecutivas sino porque la disección analítica facilita comprender dónde se superponen y dónde divergen las demandas que cada dominio impone al cerebro del aprendiz. A lo largo del recorrido se abordan también la dislexia y la discalculia, no como apéndices clínicos sino como ventanas privilegiadas para entender qué ocurre cuando algún eslabón de la cadena neurocognitiva no madura según la trayectoria típica. El cierre del capítulo ofrece orientaciones neurodidácticas concretas secuencias, materiales, dinámicas de aula que buscan tender un puente entre el laboratorio y la práctica cotidiana del docente.

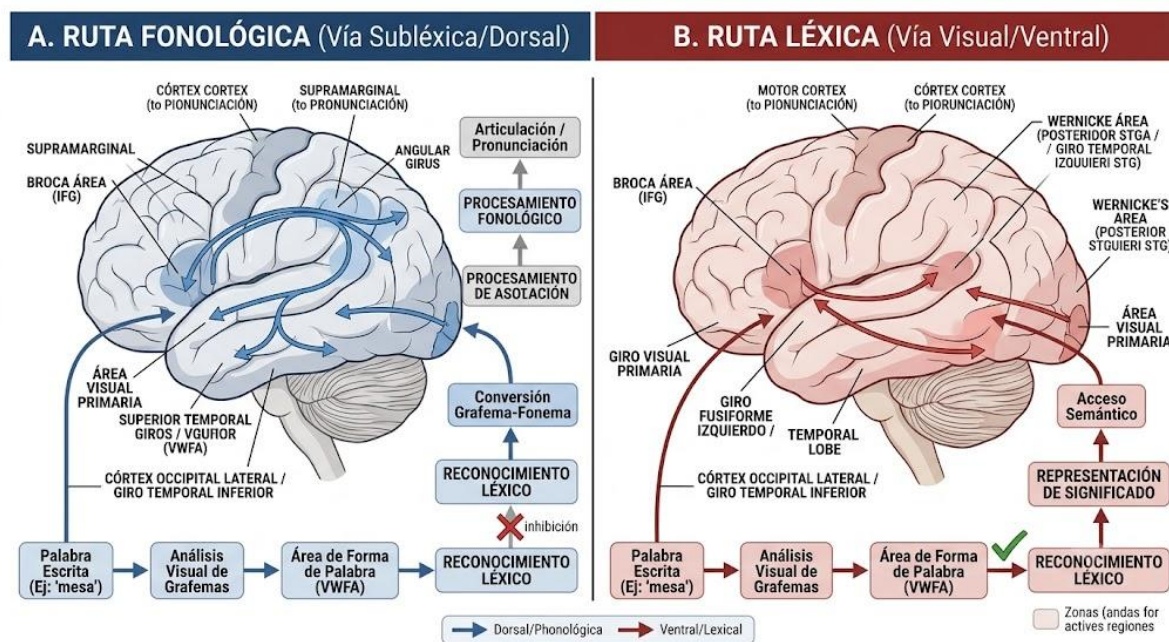
### **5.1. El cerebro lector: circuitos neuronales de la lectura, el modelo de doble ruta y la hipótesis del reciclaje neuronal de Dehaene**

Leer no es mirar letras; leer es orquestar, en menos de 300 milisegundos por palabra, una cascada de operaciones que va desde la detección de rasgos visuales invariantes hasta la activación de significados almacenados en redes semánticas distribuidas. La investigación con resonancia magnética funcional y con electrofisiología cortical ha permitido trazar un mapa bastante convergente de las regiones implicadas. Una zona occípito-temporal ventral del hemisferio izquierdo, bautizada por Dehaene (2009) como el área de la forma visual de las

palabras (VWFA, por sus siglas en inglés), responde de manera selectiva a cadenas de letras del sistema de escritura conocido por el lector, discriminándolas de estímulos visuales de complejidad similar pero sin valor lingüístico. Esa selectividad no es innata; aparece conforme el niño se alfabetiza, y su consolidación se correlaciona con la fluidez lectora alcanzada hacia los ocho o nueve años (Dehaene et al., 2015).

**Figura 29**

*El Modelo de Doble Ruta de la Lectura*



La propuesta teórica que mejor articula el recorrido de la información visual hasta la pronunciación y el significado sigue siendo, con matices y revisiones, el modelo de doble ruta, cuya formalización computacional más influyente fue el DRC (Dual-Route Cascaded) de Coltheart et al. (2001). Según este modelo, una ruta léxica permite el reconocimiento directo de palabras familiares cuya representación ortográfica está almacenada en un lexicón mental, mientras que una ruta subléxica aplica reglas de conversión grafema-fonema para decodificar palabras nuevas o pseudopalabras. La lectura competente no prescinde de ninguna de las dos: la ruta léxica garantiza velocidad y manejo de excepciones ortográficas; la ruta subléxica otorga autonomía ante lo desconocido. Que ambas rutas coexistan y cooperen tiene consecuencias pedagógicas directas, porque un método de enseñanza que potencie solo una de ellas deja al aprendiz con un repertorio incompleto.

Los métodos globales, que enfatizan el reconocimiento de palabras enteras y la exposición al texto significativo, fortalecen preferentemente la ruta léxica. Los métodos

fónicos, que enseñan de forma sistemática las correspondencias grafema-fonema, desarrollan la ruta subléxica. La neurociencia de la lectura no respalda la dicotomía excluyente que durante décadas enfrentó a ambos enfoques en las llamadas "guerras de la lectura"; más bien sugiere que la instrucción eficaz integra componentes de ambos, con un énfasis inicial en el código fonológico que permita al niño decodificar de forma autónoma y una exposición creciente a textos completos que alimente el lexicón ortográfico. La evidencia acumulada desde el informe del National Reading Panel (2000) y confirmada por revisiones más recientes (Castles et al., 2018) converge en que la instrucción fónica sistemática produce ventajas significativas en decodificación y, cuando se acompaña de trabajo en comprensión y vocabulario, también en comprensión lectora.

La hipótesis del reciclaje neuronal, formulada por Dehaene (2009) y refinada en trabajos posteriores (Dehaene-Lambertz et al., 2018), ofrece un marco evolutivo para entender por qué un cerebro que nunca fue seleccionado para leer puede, sin embargo, aprender a hacerlo. Según esta hipótesis, la lectura se instala en corteza visual ventral que originalmente procesaba formas, contornos y objetos, reutilizando su competencia para el reconocimiento de invariantes visuales. Las letras son, desde la óptica cortical, configuraciones de trazos que se distinguen por intersecciones en T, en L o en Y, rasgos presentes en el entorno visual natural. La alfabetización no crea circuitos ex nihilo; recicla circuitos preexistentes, y esa reutilización conlleva un costo: parte del territorio cortical que respondía a caras o a objetos cede espacio a la representación ortográfica (Dehaene & Cohen, 2011).

Datos recientes de neuroimagen longitudinal con niños de seis y siete años confirman que la reorganización de la corteza occípito-temporal es progresiva y que el grado de especialización de la VWFA predice la ganancia en fluidez lectora un año después (Centanni et al., 2022). La velocidad de esa reorganización no depende solo de la maduración biológica; la calidad y la intensidad de la instrucción lectora modulan significativamente la tasa de especialización cortical. Un estudio de Yeatman et al. (2012) demostró que la integridad de la sustancia blanca en el fascículo arqueado el tracto que conecta regiones temporales con regiones frontales del lenguaje mejoraba más rápidamente en los niños que recibían instrucción fónica intensiva que en quienes seguían programas menos estructurados. Estas observaciones tienen un corolario pedagógico directo: la enseñanza sistemática del código no es una opción metodológica neutra; es un acelerador de la reorganización cortical que sustenta la lectura.

Conviene detenerse un momento en la convergencia entre la hipótesis del reciclaje y el carácter biológicamente secundario de la lectura. Geary (2007) distinguió entre habilidades biológicamente primarias como el lenguaje oral o la cognición espacial, que emergen sin

instrucción explícita y habilidades biológicamente secundarias como la lectura y la aritmética formal, que requieren enseñanza deliberada. La escritura alfabética existe desde hace aproximadamente cinco mil años, y la alfabetización masiva apenas desde hace dos siglos; la presión selectiva no ha tenido tiempo de esculpir circuitos dedicados. La lectura se monta, por tanto, sobre circuitos prestados, y la pedagogía es el cincel que dirige el reciclaje. La metáfora no es gratuita: si el docente comprende que está ayudando al cerebro del niño a reasignar territorio cortical, quizá entienda mejor por qué la enseñanza de la lectura requiere sistematicidad, repetición y paciencia, y por qué no basta con sumergir al niño en un entorno letrado esperando que el aprendizaje "emerja" espontáneamente.

## **5.2. Conciencia fonológica, principio alfabético y fluidez lectora: bases neurocognitivas y secuencia didáctica fundamentada**

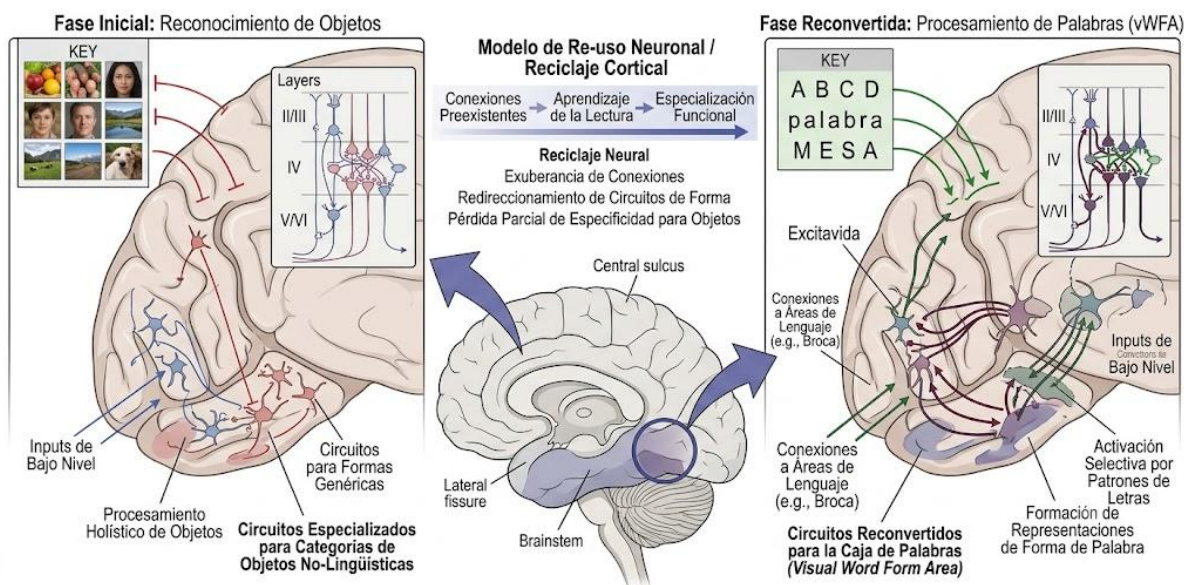
Si hay un hallazgo replicado con suficiente robustez como para orientar la práctica docente, es que la conciencia fonológica la capacidad explícita de identificar, segmentar y manipular los sonidos del habla constituye el predictor más potente del éxito lector inicial en lenguas con escritura alfabética (Melby-Lervåg et al., 2012). No se trata de una correlación casual: la conciencia fonológica permite al niño comprender el principio alfabético, esto es, la correspondencia sistemática entre grafemas y fonemas que vertebra todo sistema de escritura alfabético. Sin esa comprensión, las letras son formas arbitrarias privadas de anclaje sonoro, y el aprendizaje se reduce a memorización visual sin productividad generativa.

Desde el punto de vista neural, la conciencia fonológica recluta regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo, particularmente el giro frontal inferior (área de Broca y zonas adyacentes) y la unión temporo-parietal, donde confluyen las representaciones auditivas del habla con las representaciones articulatorias y, progresivamente, con las representaciones ortográficas (Kovelman et al., 2012). La maduración de estas regiones no es uniforme: el procesamiento fonológico de unidades grandes como las sílabas se consolida antes que el de unidades pequeñas como los fonemas individuales, lo cual tiene una implicación directa para la secuencia didáctica. Comenzar por actividades de segmentación silábica (palmear las sílabas de una palabra, por ejemplo) antes de pasar a la identificación de fonemas aislados respeta la cronología madurativa del sistema fonológico cortical.

**Figura 30**

*El Reciclaje Neuronal del Área de la Forma Visual de la Palabra*

**RECONVERSIÓN NEURAL DEL CÓRTEX VENTRAL OCCIPITOTEMPORAL IZQUIERDO PARA LA LECTURA**



Trabajos de intervención realizados con niños hispanohablantes de cinco y seis años han demostrado que programas que siguen esta gradación de la sílaba al fonema, del análisis a la síntesis producen mejoras significativas en decodificación temprana (Gutiérrez-Fresneda & Díez-Mediavilla, 2018). El español, por su ortografía transparente donde la relación grafema-fonema es altamente predecible, facilita el aprendizaje de la ruta subléxica en comparación con lenguas opacas como el inglés, pero esa transparencia no elimina la necesidad de instrucción fonológica explícita; solo modifica su duración y su foco. En español, la principal dificultad no reside en grafemas inconsistentes sino en la velocidad de ensamblaje: el niño que comprende las correspondencias puede decodificar pronto, pero la fluidez leer con la suficiente rapidez como para que la memoria de trabajo no se sature antes de completar la oración requiere práctica adicional sostenida.

El paso de la conciencia fonológica a la decodificación fluida no es automático; requiere práctica sostenida en la que el niño aplique las correspondencias grafema-fonema a palabras reales dentro de textos con sentido. La fluidez lectora, entendida como la capacidad de leer con precisión, velocidad adecuada y prosodia, implica la automatización de los procesos de bajo nivel para que los recursos de la memoria de trabajo queden disponibles para la comprensión. Investigaciones con potenciales evocados han mostrado que los lectores fluidos generan un componente N170 lateralizado a la izquierda ante cadenas ortográficas, mientras que los

lectores principiantes distribuyen la activación de forma más bilateral, indicando un procesamiento todavía no especializado (Maurer et al., 2006). Esa lateralización progresiva es un marcador neural de la automatización, y la pedagogía puede favorecerla mediante exposición repetida a textos graduados en dificultad, lectura oral guiada y relectura con objetivos específicos.

Un metaanálisis reciente de programas de fluidez lectora en español encontró tamaños de efecto moderados a grandes cuando la instrucción combinaba lectura repetida con retroalimentación correctiva inmediata (Suárez-Coalla et al., 2022). La retroalimentación es un componente que la neurociencia del aprendizaje respalda con vigor: la señal de error que el cerebro recibe cuando una pronunciación es corregida activa circuitos de predicción y ajuste en la corteza prefrontal y los ganglios basales, circuitos homólogos a los que operan en el aprendizaje motor (Ullman, 2004). La lectura, en sus fases iniciales, comparte con el aprendizaje motor la necesidad de práctica distribuida, retroalimentación inmediata y automatización progresiva; ignorar esa analogía lleva a subestimar la cantidad de práctica que la decodificación fluida demanda.

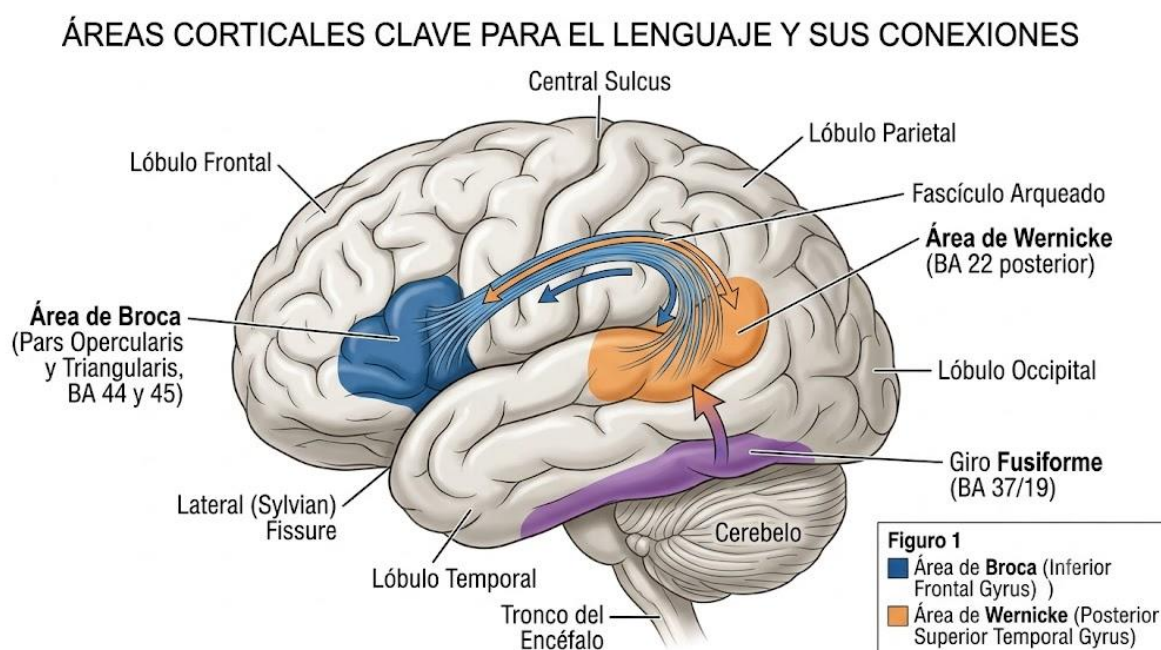
La secuencia didáctica que se desprende de la evidencia neurocognitiva puede articularse en una progresión que respeta la maduración cortical y la lógica del sistema alfabético. Primero, el desarrollo de la conciencia fonológica mediante juegos de segmentación, rima, supresión y adición de sonidos, empezando por la sílaba y avanzando hacia el fonema. Segundo, la enseñanza explícita y sistemática de las correspondencias grafema-fonema, presentando cada correspondencia de forma aislada, practicándola en combinación y aplicándola a la lectura de palabras y frases cortas. Tercero, la práctica de lectura conectada con textos decodificables textos diseñados para contener mayoritariamente las correspondencias ya enseñadas que permitan al niño experimentar éxito temprano y acumular exposición. Cuarto, la incorporación progresiva de textos naturales más ricos en vocabulario y estructura, que alimenten la ruta léxica y la comprensión. Esta gradación no es un invento pedagógico moderno; refleja la secuencia de reclutamiento cortical que la neuroimagen ha documentado en lectores en desarrollo (Pugh et al., 2001).

### 5.3. De la decodificación a la comprensión: procesos inferenciales, memoria de trabajo verbal y construcción de modelos situacionales durante la lectura

Decodificar no es comprender, aunque sin decodificación no hay comprensión posible en un lector que depende del texto escrito. La transición entre ambos niveles constituye uno de los retos más persistentes de la enseñanza de la lectura, y su explicación neurocognitiva exige considerar al menos tres componentes que operan de manera concurrente: la generación de inferencias, la gestión de la información en la memoria de trabajo verbal y la construcción de modelos situacionales.

#### Figura 31

*Circuito neural de la lectura en desarrollo*



La comprensión lectora exige que el lector vaya más allá de lo explícito. Los textos, incluso los más sencillos, están plagados de vacíos informativos que el lector debe rellenar con conocimiento previo, inferencias causales, inferencias elaborativas y predicciones. Kintsch (1998), en su modelo de Construcción-Integración, propuso que el lector genera una representación proposicional del texto (la base del texto) y, simultáneamente, elabora un modelo situacional que integra la información textual con el conocimiento del mundo. Estudios con resonancia magnética funcional han localizado los procesos inferenciales en una red que incluye la corteza prefrontal medial, la unión temporo-parietal y el polo temporal anterior, regiones que también participan en la teoría de la mente y en la comprensión narrativa (Mar, 2011). Esa superposición no es anecdótica: sugiere que comprender un texto es, en buena

medida, simular mentalmente la situación descrita, lo que explicaría por qué la lectura de narraciones activa corteza sensoriomotora asociada a las acciones referidas (Binder & Desai, 2011).

La memoria de trabajo verbal impone un cuello de botella ineludible. El lector necesita retener las proposiciones recién leídas mientras integra las nuevas, y la capacidad de ese buffer es limitada. Gathercole y Alloway (2008) documentaron que los niños con baja capacidad de memoria de trabajo verbal presentan dificultades de comprensión lectora incluso cuando su decodificación es adecuada, un perfil que los modelos clásicos de dislexia no capturan bien y que configura lo que algunos autores denominan dificultad específica de comprensión. Desde la perspectiva didáctica, las estrategias que segmentan el texto, promueven la paráfrasis parcial y solicitan al niño que verbalice lo comprendido tras cada fragmento constituyen andamiajes que compensan esa limitación mnemónica sin eliminar la exigencia cognitiva del proceso.

García-Madruga et al. (2021) mostraron que un programa de entrenamiento en estrategias de comprensión basadas en la generación explícita de inferencias mejoró la comprensión lectora de estudiantes de tercer grado con tamaños de efecto significativos, y que los beneficios se mantenían seis meses después de finalizada la intervención. El programa instruía a los niños en tres tipos de inferencia causal, predictiva y evaluativa mediante modelado del docente, práctica guiada y práctica independiente con textos narrativos y expositivos. La neurociencia aporta una explicación plausible de por qué la enseñanza explícita de inferencias funciona: al hacer consciente un proceso que en el lector experto ocurre de forma automática, se recluta la corteza prefrontal como reguladora metacognitiva, compensando la falta de automatización del lector principiante y proporcionando un andamiaje ejecutivo que se puede retirar gradualmente.

No puede obviarse que la comprensión es profundamente dependiente del vocabulario. El conocimiento léxico actúa como andamio semántico sin el cual las inferencias carecen de materia prima. Investigaciones longitudinales han confirmado que la amplitud del vocabulario a los cinco años predice la comprensión lectora a los nueve con una fuerza comparable a la de la conciencia fonológica para la decodificación (Spencer et al., 2023). Esta doble predictibilidad señala que una enseñanza de la lectura neurocognitivamente informada no puede concentrarse solo en el código; necesita alimentar, desde el primer día, el reservorio léxico y conceptual del niño mediante lectura compartida en voz alta, discusión de vocabulario en contexto y exposición a textos variados en género y tema. Perfetti (2007) propuso la hipótesis de la calidad léxica, según la cual la comprensión lectora depende no solo de cuántas palabras conoce el lector sino de la precisión y la integración de sus representaciones

ortográficas, fonológicas y semánticas. Un niño que conoce una palabra solo de oído sin representación ortográfica estable y otro que la ha leído pero no la asocia a un significado preciso tienen ambas representaciones de baja calidad que lastran la comprensión. La enseñanza que trabaja simultáneamente la forma escrita, la pronunciación y el significado en contexto produce representaciones de mayor calidad y, por tanto, una comprensión más robusta.

Otro factor que merece atención es el papel del conocimiento previo en la comprensión. El modelo situacional de Kintsch solo se construye si el lector dispone de esquemas de conocimiento sobre el tema del texto. Un niño que lee sobre volcanes sin saber qué es un volcán construirá una representación textual superficial reconocerá las palabras, procesará la sintaxis pero no generará un modelo mental coherente de la situación descrita. La investigación de Recht y Leslie (1988), ya clásica pero replicada con variantes contemporáneas, demostró que el conocimiento previo del tema puede compensar incluso diferencias en habilidad lectora general: niños con baja habilidad lectora pero alto conocimiento del tema comprendió mejor un texto sobre béisbol que niños con alta habilidad lectora pero bajo conocimiento. La traducción pedagógica es que antes de pedir a un niño que lea un texto informativo, el docente necesita activar o construir el conocimiento previo relevante mediante discusión, experiencias directas, vídeos o lectura en voz alta de textos relacionados.

#### **5.4. La escritura como proceso neurocognitivo complejo: coordinación grafomotora, planificación discursiva y revisión metacognitiva**

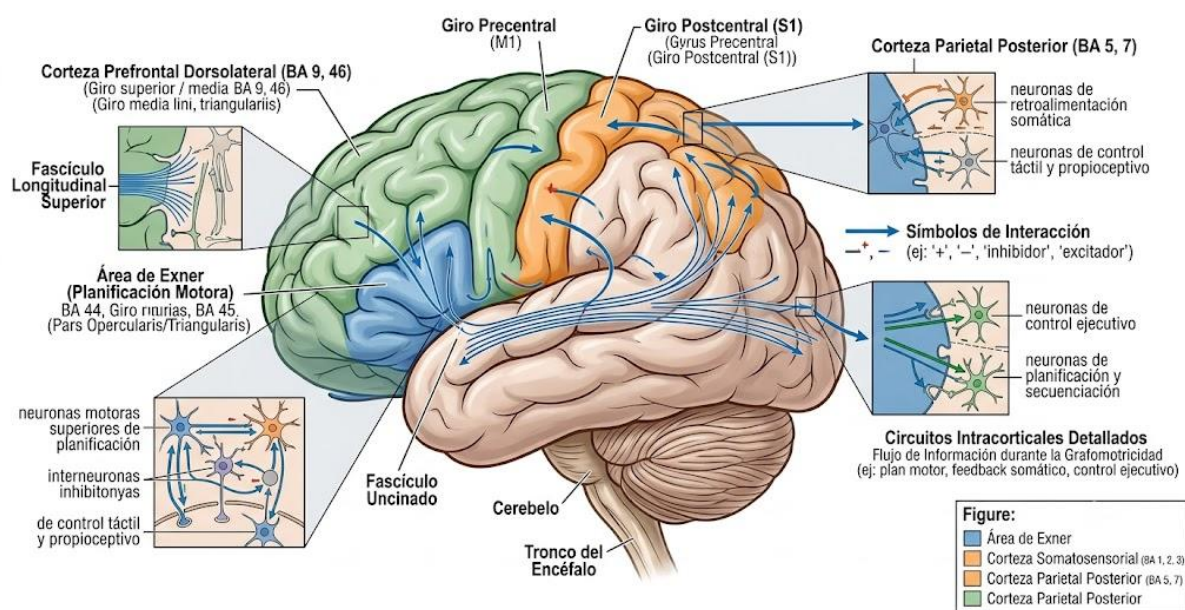
Escribir es, si cabe, más exigente que leer, porque obliga al cerebro a coordinar procesos que van desde la programación motora fina de la mano hasta la planificación retórica de un texto coherente. La investigación neurocognitiva de la escritura se ha desarrollado con menor volumen que la de la lectura, pero los hallazgos disponibles permiten articular un marco útil para la didáctica.

La grafomotricidad el trazado manual de letras recluta una red que incluye la corteza premotora dorsal, el cerebelo, los ganglios basales y la corteza parietal superior (Planton et al., 2013). La escritura manuscrita no es un mero residuo analógico en la era digital; hay evidencia convergente de que el acto de trazar letras a mano fortalece las representaciones ortográficas de un modo que la escritura en teclado no replica plenamente. James y Engelhardt (2012) demostraron con resonancia magnética funcional que niños prelectores que practicaban el trazado manual de letras mostraban mayor activación en regiones asociadas a la lectura que los

que las tecleaban o las trazaban sobre puntos, un hallazgo que ha sido replicado con variantes metodológicas en estudios posteriores (Vinci-Booher et al., 2021). La implicación práctica es clara: la escritura manuscrita, lejos de ser prescindible, contribuye a cimentar la lectura, y su abandono prematuro en favor exclusivo del teclado podría debilitar un circuito de retroalimentación entre producción motora y representación ortográfica que el cerebro aprovecha durante la alfabetización.

## Figura 32

### *Procesamiento neurocognitivo de la escritura*



Un estudio multicéntrico europeo coordinado por Van der Meer y Van der Weel (2017) comparó la actividad electroencefalográfica de niños de doce años y adultos durante la escritura manuscrita y la escritura en teclado, encontrando que solo la escritura a mano generaba patrones de activación theta y alfa en regiones parietales y centrales asociados con el aprendizaje y la memoria. Los autores interpretaron estos patrones como evidencia de que la escritura manuscrita involucra una integración sensoriomotora más rica visual, propioceptiva y motora que el tecleo, donde la acción motora es uniforme para todas las letras (presionar una tecla es biomecánicamente idéntico para la A y para la Z). Esta integración multimodal parece fortalecer la huella mnémica de la letra y, por extensión, del aprendizaje asociado al acto de escribir.

Más allá del trazo, la escritura compositiva producir un texto con propósito comunicativo demanda planificación, traducción lingüística y revisión, tres procesos que

Hayes y Flower (1980) identificaron en su modelo clásico y que la neurociencia ha confirmado con sustrato cortical diferenciable. La planificación activa la corteza prefrontal dorsolateral, sede de las funciones ejecutivas que organizan las ideas antes de traducirlas en lenguaje. La traducción la conversión de intenciones comunicativas en oraciones involucra regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo, similares a las del habla pero con demandas adicionales de ortografía y puntuación. La revisión, por su parte, requiere monitorización metacognitiva y detección de errores, funciones ancladas en la corteza cingulada anterior y la corteza prefrontal medial (Olive, 2022).

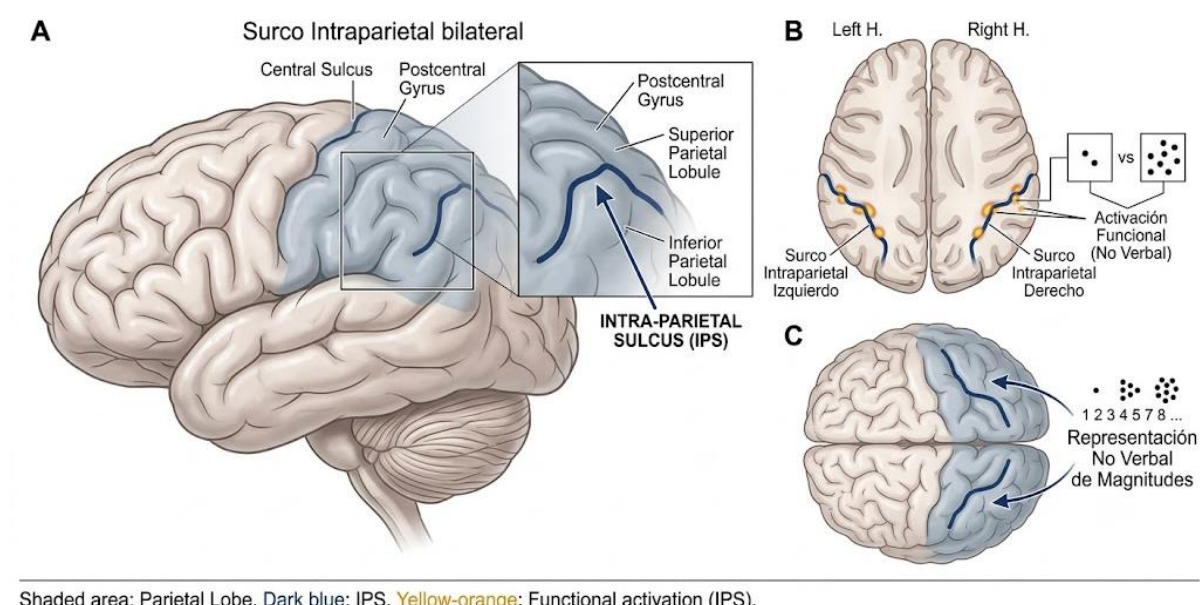
Para niños de educación básica, la sobrecarga cognitiva de escribir es enorme. Si el trazo de letras no está automatizado, la memoria de trabajo se satura en el nivel grafomotor y queda poco espacio para planificar o revisar. Esta observación explica un fenómeno que todo docente reconoce: el niño que oralmente cuenta una historia rica y bien estructurada pero que al escribirla produce un texto escueto, incoherente o plagado de errores ortográficos. No ha perdido sus ideas; ha perdido la capacidad de gestionarlas mientras su corteza motora lucha con la ejecución del trazo. La instrucción que separa temporalmente las fases primero se planifica oralmente, después se escribe el borrador, después se revisa con guía del docente reduce la carga simultánea y permite que el niño progrese en cada componente sin que uno colapse al otro.

Graham et al. (2012), en un metaanálisis que sigue siendo referencia, mostraron que la enseñanza explícita de estrategias de planificación y revisión producía mejoras sustanciales en la calidad de los textos escritos por estudiantes de primaria, con efectos más pronunciados en los escritores con mayores dificultades. El programa SRSD (Self-Regulated Strategy Development), analizado en múltiples estudios incluidos en ese metaanálisis, enseña al niño estrategias mnemónicas para planificar (por ejemplo, la estrategia POW: Pick my idea, Organize my notes, Write and say more) y listas de autoverificación para revisar. Desde la neurociencia, estas estrategias externalizan funciones ejecutivas que la corteza prefrontal del niño aún no puede gestionar de forma autónoma, funcionando como prótesis cognitivas temporales que se retiran conforme la autorregulación madura. El paralelo con el andamiaje vigotskiano es evidente, pero aquí el andamiaje tiene un correlato cortical identificable: la corteza prefrontal opera con mayor eficiencia cuando dispone de señales externas que reducen la ambigüedad de la tarea.

## 5.5. El cerebro matemático: representación de la numerosidad, sentido numérico aproximado y el papel del surco intraparietal

**Figura 33**

*El Circuito del Sentido Numérico y el Surco Intraparietal*



El cerebro humano posee, antes de cualquier instrucción, una capacidad para representar cantidades de forma aproximada. Esa competencia preverbal, denominada sentido numérico aproximado (ANS, por su sigla en inglés), ha sido documentada en neonatos, en primates no humanos y en culturas sin escolarización formal, lo cual apunta a un fundamento biológico compartido (Dehaene, 2011). El ANS permite discriminar entre dos colecciones de objetos cuando difieren en una proporción suficiente, y su precisión medida por la fracción de Weber mejora con la edad y varía entre individuos. Lo que la instrucción escolar añade es un sistema de representación exacta, simbólica, que trasciende los límites del ANS y permite operar con cantidades precisas, con la notación posicional y, eventualmente, con la abstracción algebraica.

El surco intraparietal (IPS) del lóbulo parietal bilateral constituye el nodo central de la red cerebral que sustenta la representación de la numerosidad. Estudios con resonancia magnética funcional en adultos y en niños han mostrado que el IPS se activa tanto durante tareas de comparación de magnitudes no simbólicas (conjuntos de puntos) como durante la manipulación de números arábigos, lo cual sugiere que esta región actúa como interfaz entre la representación analógica de la cantidad y su codificación simbólica (Piazza et al., 2007). Trabajos más recientes con análisis de patrones multivariados (MVPA) han refinado la

topografía funcional del IPS, revelando que distintas subregiones codifican la numerosidad simbólica y la no simbólica con grados parcialmente independientes de solapamiento, una observación que debilita las versiones más fuertes de la hipótesis de un código de magnitud único pero que confirma al IPS como territorio crítico para la cognición numérica (Mock et al., 2018).

Más allá del IPS, la red numérica incluye la corteza prefrontal particularmente la dorsolateral, implicada en la manipulación activa de cantidades en memoria de trabajo y regiones del giro angular izquierdo, asociadas a la recuperación de hechos aritméticos verbalmente codificados, como las tablas de multiplicar (Dehaene et al., 2003). Esta distribución cortical explica por qué la aritmética no es un proceso monolítico: sumar dos más tres puede resolverse por recuperación directa de la memoria verbal, mientras que estimar si 47 es más cercano a 40 o a 50 recluta preferentemente los circuitos de magnitud del IPS. La pedagogía que ignora esta distinción trata todas las operaciones como si demandaran el mismo tipo de procesamiento, cuando la evidencia muestra que la fluidez en hechos aritméticos básicos y la comprensión conceptual de las operaciones dependen de redes parcialmente diferenciables y, por tanto, merecen abordajes didácticos diferenciados.

Un debate que ha tenido consecuencias prácticas considerables se refiere a la relación entre la precisión del ANS y el rendimiento matemático escolar. Halberda et al. (2008) publicaron un estudio influyente que mostraba correlación entre la acuidad del ANS en adolescentes y sus calificaciones en matemáticas, lo cual generó la expectativa de que entrenar el sentido numérico aproximado podría mejorar el aprendizaje aritmético. La evidencia acumulada en los años siguientes ha templado ese optimismo. Metaanálisis recientes indican que la correlación entre ANS y matemáticas formales, aunque consistente, es modesta y mediada por variables como la inhibición cognitiva y el conocimiento de los símbolos numéricos (Schneider et al., 2017). Más que entrenar la discriminación de puntos, parece más fértil fortalecer el mapeo entre representaciones no simbólicas y simbólicas: que el niño vincule la intuición de "más" y "menos" con los dígitos y las palabras numéricas correspondientes. Programas de intervención que trabajan explícitamente esa conexión usar líneas numéricas, comparar conjuntos de objetos con su cardinal escrito, estimar antes de contar han mostrado efectos positivos en niños de transición y primer grado (Dillon et al., 2017).

Otro componente que la investigación ha puesto de relieve es el sentido espacial de los números. La representación mental de las magnitudes numéricas parece organizarse a lo largo de un eje espacial la llamada línea numérica mental con los números pequeños asociados al espacio izquierdo y los grandes al derecho, al menos en culturas con escritura de izquierda a

derecha. El efecto SNARC (Spatial-Numerical Association of Response Codes), documentado por Dehaene et al. (1993), ha sido observado ya en niños de siete años, y la precisión con que un niño ubica números en una línea numérica física correlaciona con su rendimiento aritmético posterior (Siegler & Booth, 2004). Este hallazgo ha dado lugar a intervenciones didácticas basadas en juegos de tablero lineales donde el niño avanza por casillas numeradas que han demostrado mejorar la representación numérica lineal y, por extensión, la comprensión del orden y la magnitud (Ramani & Siegler, 2008). Réplicas recientes con muestras más amplias y en contextos latinoamericanos han confirmado la robustez del efecto y han extendido los beneficios a niños de nivel socioeconómico bajo, quienes mostraron las mayores ganancias (Susperreguy et al., 2022).

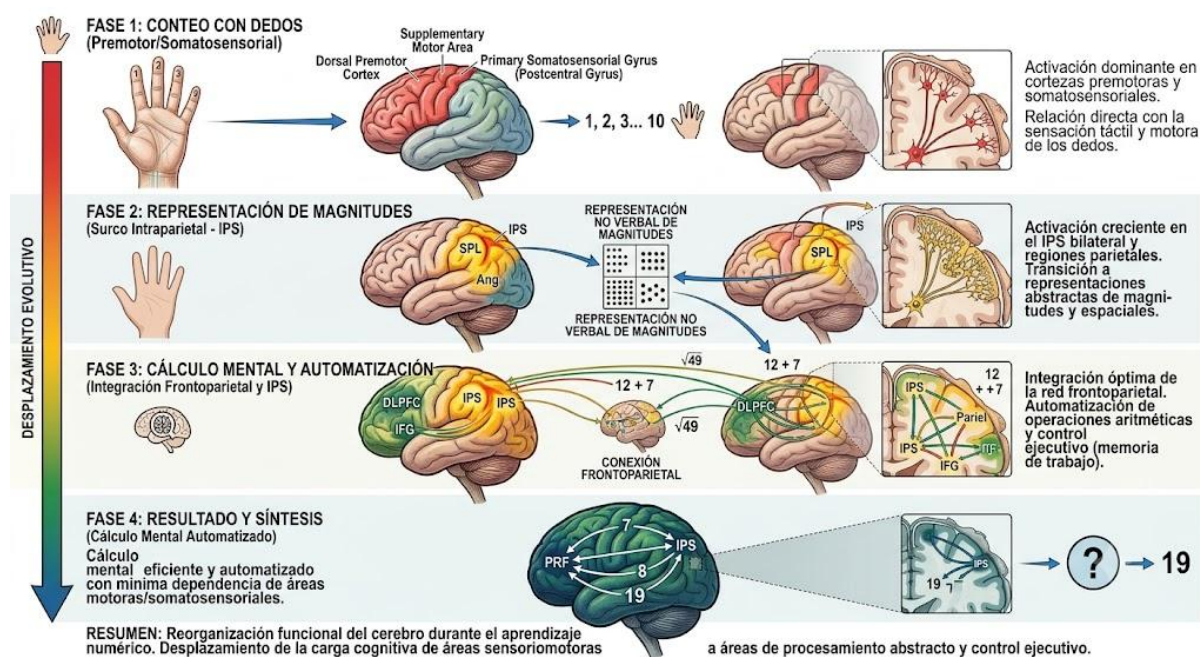
### **5.6. Del conteo a la aritmética y del razonamiento concreto al abstracto: trayectorias neurocognitivas del pensamiento lógico-matemático entre los 5 y los 12 años**

La trayectoria que lleva al niño desde contar objetos con los dedos hasta resolver ecuaciones simbólicas abarca cambios profundos en la organización funcional de las redes cerebrales implicadas. A los cinco o seis años, la resolución de problemas aritméticos simples recluta masivamente la corteza prefrontal, lo cual refleja el esfuerzo ejecutivo y atencional que requiere una operación todavía no automatizada. Conforme el niño gana experiencia y práctica, la activación frontal decrece y aumenta la del surco intraparietal y, para los hechos aritméticos memorizados, la del giro angular y estructuras temporales mediales vinculadas a la recuperación desde la memoria a largo plazo (Rivera et al., 2005). Este desplazamiento de frontal a parietal es un marcador neural de la automatización aritmética análogo a la lateralización de la VWFA en la lectura.

El conteo con los dedos, lejos de ser un hábito que deba corregirse tempranamente, parece cumplir una función representacional relevante. La corteza somatosensorial que codifica la representación de los dedos es adyacente al surco intraparietal, y estudios de neuroimagen han mostrado superposición funcional entre ambas regiones durante tareas numéricas (Rusconi et al., 2005). Gracia-Bafalluy y Noël (2008) encontraron que el entrenamiento de la discriminación táctil de los dedos en niños de primer grado mejoraba el rendimiento en tareas numéricas, un resultado que sugiere que los dedos no son solo un soporte externo sino un componente encarnado de la representación de la cantidad. La didáctica que prohíbe contar con los dedos por considerarlo "inmaduro" podría estar privando al niño de un andamiaje somatosensorial que facilita la transición hacia la representación abstracta.

**Figura 34**

*Transición de la aritmética concreta a la abstracta*



Entre los seis y los nueve años se produce una transformación cualitativa que Piaget identificó como el paso del pensamiento preoperatorio al operatorio concreto, y que la neurociencia reinterpreta en términos de maduración de la conectividad fronto-parietal y del desarrollo de la inhibición cognitiva. La capacidad de conservar la cantidad entender que verter líquido de un vaso ancho a uno alto no cambia la cantidad requiere inhibir la respuesta perceptiva dominante ("el vaso alto tiene más") y aplicar una regla lógica. Houdé et al. (2011) demostraron con neuroimagen que los adultos que resuelven correctamente tareas piagetianas activan la corteza prefrontal derecha en mayor medida que quienes yerran, sugiriendo que la superación del error intuitivo depende de mecanismos inhibitorios, no solo de la adquisición de estructuras lógicas nuevas. Esta perspectiva neuroinhibitoria del desarrollo cognitivo tiene ramificaciones pedagógicas que no deberían subestimarse: enseñar al niño a detectar la "trampa perceptiva" y a frenar su respuesta impulsiva puede ser tan valioso como enseñarle la regla lógica misma.

El paso del razonamiento concreto al abstracto, que convencionalmente se sitúa entre los diez y los doce años, no ocurre de forma abrupta ni homogénea. Datos de neuroimagen longitudinal muestran que la capacidad de manipular variables y de razonar proporcionalmente se asocia con la maduración de la corteza prefrontal lateral y con el fortalecimiento de las conexiones entre esta y la corteza parietal posterior (Dumontheil, 2014). Pero la maduración

estructural es condición necesaria, no suficiente: el contexto instructivo modula la expresión funcional de esas capacidades emergentes. Un niño cuya corteza prefrontal ha alcanzado la madurez suficiente para el razonamiento proporcional puede no manifestar esa competencia si la instrucción que recibe no le ofrece problemas que la demanden. La zona de desarrollo próximo vigotskiana encuentra aquí una lectura neurocientífica: la enseñanza óptima es la que se adelanta ligeramente a la maduración cortical disponible, planteando desafíos que el niño puede resolver con apoyo pero no sin él.

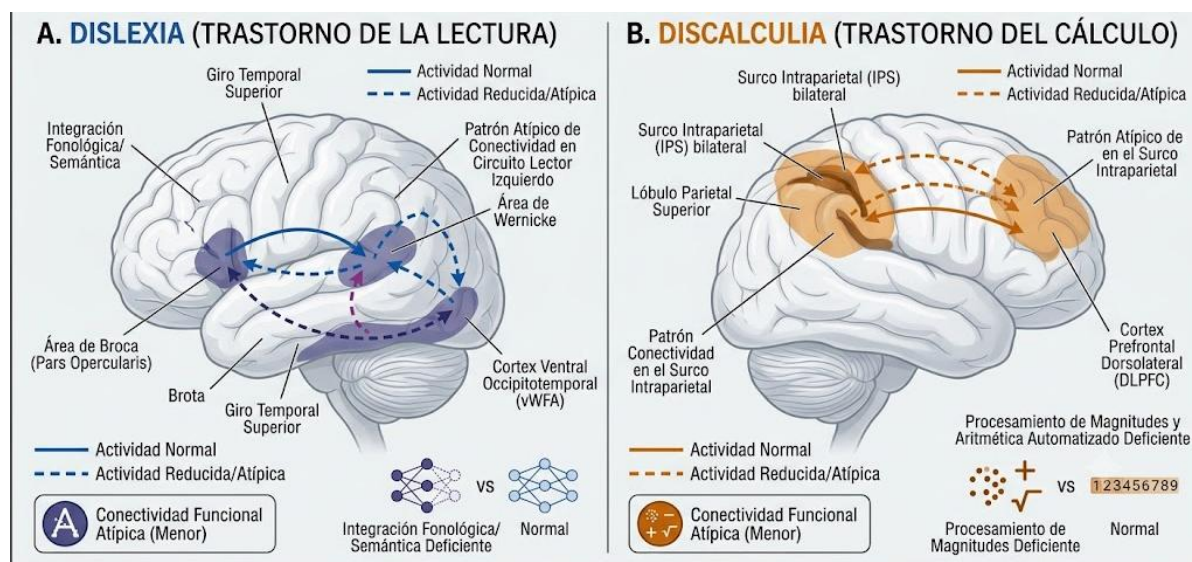
La transición aritmética también involucra un cambio de estrategias de cálculo que la neurociencia ha cartografiado con cierto detalle. Los niños pequeños utilizan predominantemente estrategias de conteo (contar todo, contar desde el mayor), que reclutan la corteza prefrontal y el surco intraparietal de forma intensa. A medida que los hechos aritméticos se consolidan en la memoria a largo plazo, la recuperación directa reemplaza al conteo y la activación se desplaza hacia el giro angular y el hipocampo (Cho et al., 2012). Qin et al. (2014) documentaron con especial elegancia esta transición en un estudio longitudinal: los niños que mostraban mayor conectividad funcional entre el hipocampo y el neocórtex durante la resolución de sumas simples a los ocho años eran quienes más rápidamente transitaban hacia la recuperación directa un año después. La implicación pedagógica es que la práctica repetida de hechos aritméticos las denostadas "cuentas" tiene un correlato neural real: consolida las representaciones en sistemas de memoria a largo plazo y libera recursos de la memoria de trabajo para operaciones más complejas. Demonizar la práctica repetitiva por considerarla mecánica equivale a privar al cerebro del niño de la oportunidad de automatizar los cimientos sobre los que se construirá el pensamiento matemático superior.

Eso no significa, evidentemente, que la práctica deba ser ciega o descontextualizada. La investigación sobre el aprendizaje procedimental muestra que la práctica espaciada distribuida en sesiones breves a lo largo de varios días produce consolidación más duradera que la práctica masiva concentrada en una sola sesión (Carpenter et al., 2012). La explicación neurobiológica reside en los procesos de consolidación dependientes del sueño: durante el sueño de ondas lentas, el hipocampo "reproduce" las experiencias diurnas y transfiere las representaciones al neocórtex, un proceso que requiere tiempo entre sesiones para completarse. El docente que reparte la práctica de hechos aritméticos en sesiones breves diarias, intercaladas con actividades de resolución de problemas y razonamiento, respeta la cronobiología de la consolidación y, simultáneamente, evita la monotonía que socava la motivación.

## 5.7. Dificultades específicas de aprendizaje en lectura y matemáticas: dislexia y discalculia desde la perspectiva neurocognitiva

**Figura 35**

*Bases neurobiológicas de la Dislexia y la Discalculia*



La dislexia y la discalculia no son etiquetas de conveniencia clínica; son trastornos del neurodesarrollo con sustratos neurobiológicos identificables que afectan, respectivamente, la adquisición de la lectura y la de la competencia aritmética en niños cuya inteligencia general, motivación y oportunidades educativas están intactas. Comprenderlas desde la neurociencia no solo beneficia a los niños que las presentan, sino que ilumina, por contraste, los mecanismos que operan en el aprendizaje típico.

La dislexia del desarrollo afecta a entre el 5 y el 10 por ciento de la población escolar, dependiendo del umbral diagnóstico y de la ortografía del idioma. Su manifestación nuclear es una dificultad persistente y desproporcionada para decodificar palabras, especialmente palabras nuevas y pseudopalabras, lo cual señala un déficit en el procesamiento fonológico y en la ruta subléxica (Vellutino et al., 2004). Estudios de neuroimagen han revelado un patrón consistente de hipoactivación en regiones posteriores del hemisferio izquierdo particularmente la unión temporo-parietal y la VWFA acompañado, en muchos casos, de hiperactivación compensatoria en regiones homólogas del hemisferio derecho y en áreas frontales izquierdas (Shaywitz & Shaywitz, 2020). Esta hiperactivación frontal no indica mayor competencia sino mayor esfuerzo: el lector disléxico recluta circuitos ejecutivos para compensar un sistema posterior de lectura que no funciona con la eficiencia esperada.

La base genética de la dislexia está bien documentada, con genes como DCDC2, KIAA0319 y DYX1C1 implicados en la migración neuronal durante el desarrollo embrionario (Galaburda et al., 2006). Variantes en estos genes podrían alterar la organización cortical en regiones perisilvianas, dificultando la formación de representaciones fonológicas precisas. Sin embargo, la genética no opera en el vacío: la expresión fenotípica de la vulnerabilidad genética depende de la interacción con el ambiente, incluida la calidad de la instrucción lectora recibida. Estudios de intervención han demostrado que programas fónicos intensivos pueden normalizar parcialmente los patrones de activación cerebral en niños disléxicos, aumentando la activación en regiones temporo-parietales izquierdas y reduciendo la compensación frontal (Simos et al., 2002; Barquero et al., 2014). Estos hallazgos subrayan que la dislexia no es una sentencia; es una vulnerabilidad que la instrucción adecuada puede mitigar, aunque raramente eliminar por completo.

La discalculia del desarrollo, menos estudiada pero igualmente real, afecta a entre el 3 y el 7 por ciento de los niños en edad escolar. Su manifestación más característica es una dificultad para representar y manipular cantidades numéricas, que se traduce en problemas con la comparación de magnitudes, el conteo, la aritmética básica y la resolución de problemas matemáticos (Butterworth et al., 2011). Desde la perspectiva neural, la discalculia se asocia con anomalías estructurales y funcionales en el surco intraparietal, particularmente del hemisferio derecho. Estudios con resonancia magnética estructural han reportado reducción de materia gris en el IPS de niños con discalculia (Rotzer et al., 2008), y estudios funcionales muestran menor activación de esta región durante tareas de comparación numérica.

Un aspecto que diferencia la discalculia de la dislexia en cuanto a atención investigativa y educativa es el grado de reconocimiento social. La dislexia cuenta con décadas de investigación, protocolos de detección temprana y programas de intervención validados. La discalculia, pese a tener una prevalencia comparable, recibe mucha menos atención, en parte porque la cultura tolera mejor la incompetencia matemática que la analfabetización. Frases como "yo nunca fui bueno para las matemáticas" se pronuncian sin vergüenza social en contextos donde declarar dificultades lectoras resultaría estigmatizante. Esta asimetría cultural tiene consecuencias educativas reales: los niños con discalculia son identificados más tarde, reciben menos apoyos específicos y acumulan más años de fracaso antes de que alguien reconozca que su dificultad tiene una base neurocognitiva y no se debe a pereza o falta de esfuerzo (Kaufmann et al., 2013).

La comorbilidad entre dislexia y discalculia es considerable entre el 30 y el 60 por ciento de los niños con una de las dos condiciones presenta también la otra, lo cual ha llevado

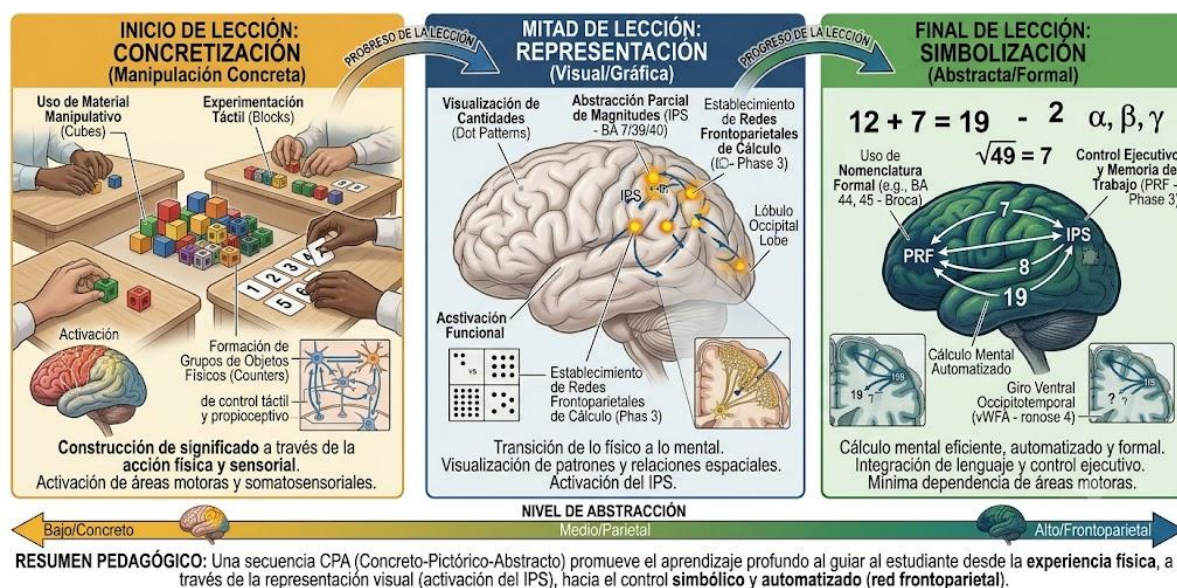
a algunos investigadores a proponer que ambas comparten una vulnerabilidad común en sistemas de dominio general, como la memoria de trabajo o la velocidad de procesamiento, además de déficits específicos de dominio en procesamiento fonológico y procesamiento numérico respectivamente (Landerl et al., 2009). Para el docente, la comorbilidad implica que la evaluación debe ser comprehensiva: un niño que presenta dificultades en lectura debería ser evaluado también en competencias numéricas, y viceversa, para evitar que una de las dos dificultades pase desapercibida bajo la sombra de la otra.

La detección temprana de ambos trastornos es un imperativo neurocognitivo. La plasticidad cerebral, que como se discutió en el capítulo 2 es máxima durante la infancia temprana, ofrece una ventana de oportunidad para la intervención. Identificar la dislexia antes de los siete años y la discalculia antes de los ocho permite intervenir cuando los circuitos corticales relevantes todavía son altamente maleables. Las herramientas de cribado basadas en tareas de conciencia fonológica, denominación rápida automatizada (RAN), comparación de magnitudes y sentido numérico pueden aplicarse en contextos escolares con relativa facilidad y permiten detectar niños en riesgo antes de que el fracaso se cronifique (Willburger et al., 2008). Un metaanálisis de Wanzek et al. (2013) mostró que las intervenciones para dificultades lectoras son significativamente más efectivas cuando se inician en primer grado que cuando se implementan en tercero o cuarto, un resultado que la neurociencia de los períodos sensibles predice pero que la organización escolar frecuentemente desatiende.

## **5.8. Orientaciones neurodidácticas concretas: secuencias, materiales y dinámicas de aula para la lectoescritura y las matemáticas basadas en evidencia cerebral**

**Figura 36**

*Secuencia didáctica neurofavorable para lectoescritura y matemáticas*



Traducir la neurociencia en práctica de aula exige una cautela que conviene explicitar. El campo de la neuroeducación ha sido plagado de neuromitos afirmaciones pseudocientíficas sobre el cerebro que circulan en el mundo educativo sin sustento empírico y de saltos inferenciales que van de hallazgos de laboratorio a recetas didácticas sin la mediación necesaria de la investigación educativa aplicada (Howard-Jones, 2014). Las orientaciones que se ofrecen a continuación no son recetas mágicas derivadas directamente de un escáner cerebral; son principios pedagógicos respaldados simultáneamente por la neurociencia cognitiva y por la investigación educativa de campo, es decir, convergen en el diagnóstico tanto los datos sobre cómo funciona el cerebro como los datos sobre qué estrategias producen mejoras medibles en el rendimiento de los estudiantes.

Para la enseñanza de la lectura, la secuencia neurodidáctica basada en la evidencia disponible puede articularse alrededor de cuatro ejes. El primer eje es la instrucción fonológica temprana y sistemática, que debe comenzar antes de la enseñanza formal de las letras y continuar en paralelo durante los primeros meses de alfabetización. Las actividades de segmentación silábica, rima, identificación de fonemas iniciales y finales, y manipulación fonémica (suprimir, añadir, sustituir sonidos) preparan las regiones perisilvianas del hemisferio izquierdo para el mapeo grafema-fonema que vendrá después. La evidencia de Ehri et al. (2001), confirmada por revisiones posteriores, indica que la instrucción fonológica es más efectiva cuando se acompaña de la presentación de las letras correspondientes, porque el grafema proporciona un anclaje visual que estabiliza la representación fonémica.

El segundo eje es la enseñanza explícita y secuenciada de las correspondencias grafema-fonema, presentadas de forma acumulativa y practicadas en contexto de lectura y escritura. La neurociencia del aprendizaje procedimental indica que la automatización requiere práctica distribuida con retroalimentación: sesiones breves y frecuentes son más eficaces que sesiones largas y esporádicas. El uso de textos decodificables diseñados para contener mayoritariamente las correspondencias ya enseñadas permite al niño aplicar lo aprendido y experimentar éxito, lo cual activa los circuitos de recompensa dopaminérgicos que refuerzan el aprendizaje (Howard-Jones et al., 2015).

El tercer eje es el desarrollo simultáneo del vocabulario y del conocimiento del mundo, que nutre la ruta léxica y proporciona la materia prima para la comprensión. La lectura en voz alta por parte del docente, la discusión del vocabulario nuevo en contexto significativo, la exposición a textos variados y las experiencias directas que amplían el conocimiento previo no son actividades complementarias sino componentes estructurales de un programa de lectura neurocognitivamente informado. Neuman y Wright (2014) demostraron que la instrucción de vocabulario integrada en unidades temáticas donde las mismas palabras aparecen en múltiples contextos producía aprendizajes más profundos y transferibles que la enseñanza de palabras aisladas.

El cuarto eje es la enseñanza explícita de estrategias de comprensión, que incluye la generación de inferencias, la identificación de la estructura textual, la formulación de predicciones y la monitorización de la propia comprensión. Estas estrategias externalizan las funciones de la corteza prefrontal que el lector experto ejecuta de forma automática, proporcionando al niño un andamiaje ejecutivo que se retira gradualmente. Duke et al. (2021) sintetizaron la evidencia sobre la enseñanza de la comprensión lectora y concluyeron que los programas más eficaces combinan la instrucción de múltiples estrategias con una práctica abundante en textos auténticos, tanto narrativos como informativos.

Para la enseñanza de las matemáticas, las orientaciones neurodidácticas pueden organizarse también en ejes convergentes. El primer eje es el fortalecimiento del sentido numérico, que incluye el trabajo con representaciones no simbólicas (conjuntos de objetos, bloques, dedos), el mapeo entre representaciones no simbólicas y simbólicas (asociar un conjunto de cinco objetos con el dígito 5 y la palabra "cinco"), y el uso de la línea numérica como herramienta de representación espacial de la magnitud. Juegos de tablero lineales, actividades de estimación y tareas de comparación de cantidades fortalecen la red del surco intraparietal y proporcionan la base intuitiva sobre la que se construirá la aritmética formal. Siegler y Ramani (2009) demostraron que tan solo una hora de juego con un tablero numérico

lineal distribuida en cuatro sesiones producía mejoras significativas en la estimación numérica de niños preescolares de nivel socioeconómico bajo.

El segundo eje es la instrucción explícita en el sistema de numeración posicional, que exige comprender el valor de posición que el 3 en 37 representa treinta y no tres como prerequisite para la aritmética multidigital. La comprensión del valor posicional recluta circuitos prefrontales y parietales que manejan relaciones parte-todo y multiplicativas (Moeller et al., 2011). El uso de materiales concretos que descompongan los números en unidades, decenas y centenas (barras, cubos, fichas de distinto color) proporciona un soporte perceptivo que la corteza parietal puede mapear sobre la notación simbólica. La transición del material concreto al pictórico y de este al simbólico la secuencia CPA (concreto-pictórico-abstracto) popularizada por Bruner y sistematizada en la enseñanza matemática de Singapur respeta la trayectoria del cerebro desde la representación encarnada hasta la representación abstracta.

El tercer eje es la automatización de los hechos aritméticos básicos mediante práctica distribuida y variada. La recuperación fluida de sumas, restas y multiplicaciones básicas libera memoria de trabajo para la resolución de problemas más complejos, del mismo modo que la decodificación automática libera recursos para la comprensión lectora. La práctica no tiene por qué ser tediosa: juegos de cartas, aplicaciones digitales bien diseñadas y competencias lúdicas pueden proporcionar la repetición necesaria sin sacrificar la motivación. Fuchs et al. (2021) mostraron que un programa que combinaba práctica de hechos aritméticos con resolución de problemas verbales producía mejoras superiores a las de programas que trabajaban cada componente por separado, sugiriendo que la interacción entre fluidez procedimental y razonamiento conceptual potencia ambos aprendizajes.

El cuarto eje es la resolución de problemas como actividad central, no marginal, de la clase de matemáticas. Resolver un problema verbal exige comprender el enunciado (comprensión lectora), identificar la estructura matemática subyacente (razonamiento relacional), seleccionar la operación adecuada (función ejecutiva) y ejecutar el cálculo (procesamiento aritmético). Los estudios de neuroimagen muestran que la resolución de problemas activa una red distribuida que incluye regiones prefrontales, parietales y temporales, más extensa que la que recluta el mero cálculo (Prabhakaran et al., 2001). Enseñar a resolver problemas no es solo enseñar a calcular; es enseñar a pensar matemáticamente, y esa enseñanza necesita modelado explícito del docente, representación visual de las relaciones entre cantidades (diagramas de barras, modelos parte-todo) y práctica guiada con problemas de complejidad creciente.

Un elemento transversal a ambos dominios lectura y matemáticas que la neurociencia refuerza con contundencia es el papel de la metacognición. La capacidad de monitorizar el propio proceso de aprendizaje, de detectar errores, de evaluar si se ha comprendido y de ajustar la estrategia cuando algo falla depende de la corteza prefrontal medial y de la corteza cingulada anterior, regiones que maduran lentamente a lo largo de la infancia y la adolescencia (Schneider, 2008). Precisamente porque esa maduración es lenta, la enseñanza explícita de habilidades metacognitivas preguntarse "¿entendí esto?", "¿tiene sentido mi respuesta?", "¿qué hago si no entiendo?" compensa el déficit madurativo y acelera la autorregulación. Metaanálisis de intervenciones metacognitivas reportan tamaños de efecto consistentemente positivos tanto en lectura como en matemáticas (Dignath & Büttner, 2008), y la neuroimagen ha confirmado que el entrenamiento metacognitivo modifica la activación prefrontal durante la resolución de tareas (Garner, 2009).

## **5.9. Cierre del capítulo. Enseñar a leer y a calcular es dialogar con la arquitectura funcional del cerebro**

La lectura y las matemáticas comparten más de lo que su separación curricular sugiere. Ambas son habilidades biológicamente secundarias que reciclan circuitos evolutivamente antiguos para propósitos culturalmente nuevos. Ambas requieren instrucción explícita y sostenida porque no emergen espontáneamente de la exposición al entorno. Ambas atraviesan una fase inicial de alto costo cognitivo donde la corteza prefrontal trabaja intensamente seguida de una fase de automatización donde regiones posteriores especializadas asumen el procesamiento que solo se alcanza mediante práctica distribuida y retroalimentación. Ambas pueden verse comprometidas por trastornos del neurodesarrollo dislexia y discalculia cuya detección temprana y abordaje basado en evidencia pueden alterar significativamente las trayectorias académicas y vitales de los niños afectados.

El mensaje que la neurociencia envía al docente de educación básica no es, sin embargo, una receta técnica para ejecutar. Es una invitación a comprender la complejidad del cerebro que tiene delante cada mañana y a ajustar la enseñanza a esa complejidad con la flexibilidad que la investigación permite y la humildad que la incertidumbre exige. El cerebro de un niño de seis años que comienza a leer está realizando una proeza de reorganización cortical comparable a cualquier hazaña evolutiva; el docente que comprende eso no enseña igual que el que lo ignora. Enseñar a leer y a calcular es, en última instancia, dialogar con la arquitectura funcional de un órgano extraordinariamente plástico pero no infinitamente maleable, cuyas

restricciones biológicas no son obstáculos sino guías para diseñar una instrucción que trabaje con el cerebro y no contra él.

El capítulo siguiente abordará tres moduladores del aprendizaje que la neurociencia ha documentado con creciente solidez el movimiento, el sueño y la nutrición y que amplían la mirada más allá de la instrucción directa hacia las condiciones corporales y ambientales que determinan si el cerebro puede aprovechar, o no, la enseñanza que recibe.

# **CAPÍTULO 6**

**El movimiento, el sueño y la nutrición como moduladores del aprendizaje: Evidencia neurocientífica para la práctica docente**

## **Introducción**

Cualquier docente experimentado ha observado, aunque quizá sin detenerse a articularlo en un marco explicativo formal, que los niños que llegan al aula sin haber dormido lo suficiente rinden peor que sus compañeros descansados, que aquellos que no desayunan pierden la concentración hacia media mañana, y que un breve período de actividad física entre clases parece reactivar la disposición atencional del grupo. Estas observaciones, que durante décadas permanecieron en el terreno de la intuición pedagógica, cuentan hoy con un respaldo neurocientífico robusto que las eleva al rango de variables educativas modificables. El cerebro humano, lejos de funcionar como un órgano aislado que procesa información con independencia de lo que ocurre en el resto del organismo, opera como parte de un sistema biológico integrado cuyo rendimiento cognitivo depende de manera directa de las condiciones fisiológicas en que se encuentra el cuerpo que lo alberga.

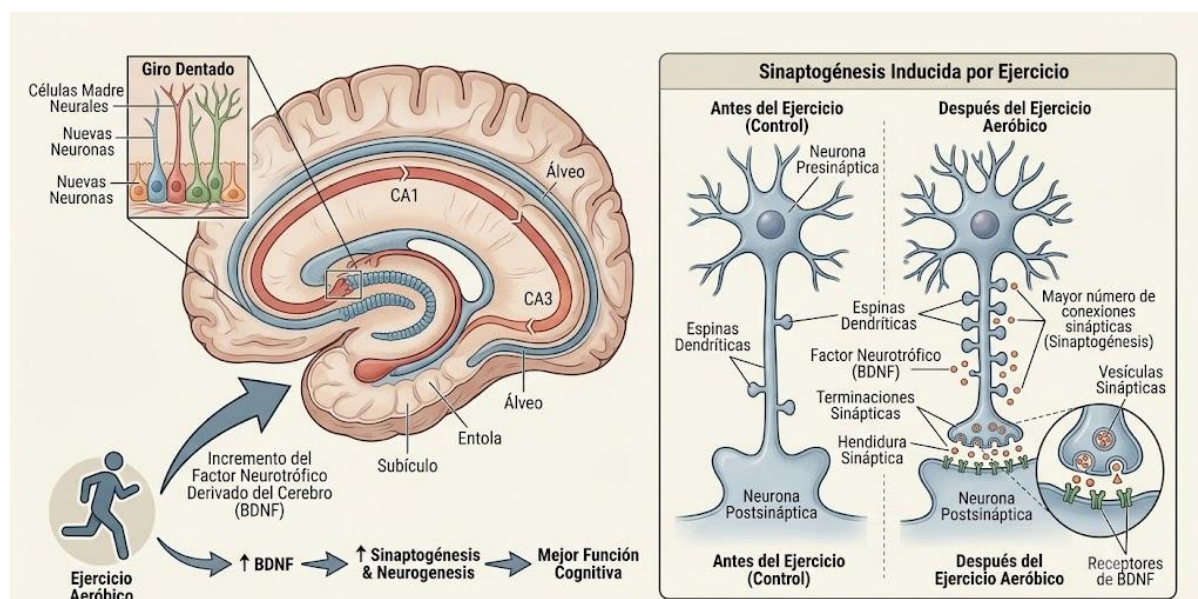
Este capítulo examina tres grandes moduladores biológicos del aprendizaje la actividad física, el sueño y la nutrición desde la perspectiva de la neurociencia cognitiva del desarrollo, con el propósito de ofrecer al docente de educación básica un marco de comprensión que le permita tomar decisiones informadas sobre la organización de la jornada escolar, la planificación de actividades y la articulación con las familias y la política institucional. La evidencia que se presenta a continuación no proviene de especulaciones teóricas sino de estudios con neuroimagen funcional, ensayos controlados aleatorizados, meta-análisis y cohortes epidemiológicas que han acumulado, especialmente en el último lustro, un volumen de datos suficiente para transformar la manera en que concebimos la relación entre cuerpo y cognición en la infancia.

### **6.1. Actividad física y cerebro: efectos del ejercicio aeróbico sobre la neurogénesis hipocampal, el BDNF y las funciones ejecutivas en la infancia**

La relación entre ejercicio físico y función cerebral dejó de ser una hipótesis marginal hace ya más de dos décadas, cuando los trabajos pioneros de Hillman, Erickson y Kramer (2008) demostraron que la actividad aeróbica sostenida producía cambios volumétricos mensurables en el hipocampo de adultos mayores. Lo que resultó particularmente revelador para el campo educativo fue que investigaciones posteriores confirmaron que estos efectos no eran exclusivos de cerebros envejecidos: el cerebro infantil, con su mayor capacidad plástica, respondía al ejercicio con incrementos incluso más pronunciados en conectividad funcional y volumen de materia gris en regiones asociadas al control ejecutivo y la memoria declarativa.

**Figura 37**

*Impacto del ejercicio físico en la neurogénesis y el BDNF*



El mecanismo molecular mejor caracterizado que media entre la actividad física y la mejora cognitiva involucra al factor neurotrófico derivado del cerebro, conocido por sus siglas en inglés como BDNF. Esta neurotrofina, sintetizada principalmente en el hipocampo y la corteza prefrontal, actúa como un fertilizante molecular que promueve la supervivencia neuronal, estimula la ramificación dendrítica y facilita la potenciación a largo plazo, el sustrato celular del aprendizaje y la memoria. Cuando un niño realiza ejercicio aeróbico de intensidad moderada correr, nadar, jugar al fútbol, saltar la cuerda, los niveles séricos y cerebrales de BDNF se elevan de manera significativa, y esta elevación correlaciona con mejoras en tareas de memoria espacial y flexibilidad cognitiva (Szuhany et al., 2015). Un meta-análisis reciente de Álvarez-Bueno et al. (2022) que incluyó 36 estudios con población infantil confirmó que las intervenciones de ejercicio aeróbico de al menos ocho semanas de duración producían efectos moderados pero consistentes sobre la memoria de trabajo y la inhibición, dos de las tres funciones ejecutivas nucleares descritas por Diamond (2013).

La neurogénesis hipocampal, durante mucho tiempo considerada un fenómeno restringido al desarrollo embrionario, fue reconocida como un proceso que continúa durante toda la vida en la zona subgranular del giro dentado. Aunque la existencia de neurogénesis adulta en humanos ha sido objeto de debate con estudios como el de Sorrells et al. (2018) cuestionando su magnitud, la evidencia en modelos animales y los datos indirectos obtenidos mediante resonancia magnética funcional en niños sugieren que el ejercicio aeróbico potencia

la proliferación de progenitores neuronales en esta región, lo cual se traduciría en una mayor capacidad para separar patrones mnésicos y codificar nuevos aprendizajes (Chaddock-Heyman et al., 2014). Los trabajos de Chaddock et al. (2010) ya habían mostrado que niños de entre 9 y 10 años con mejor aptitud aeróbica presentaban hipocampos bilateralmente más grandes y obtenían puntajes superiores en tareas de memoria relacional, un hallazgo que ha sido replicado con muestras más amplias y diversas en los años posteriores.

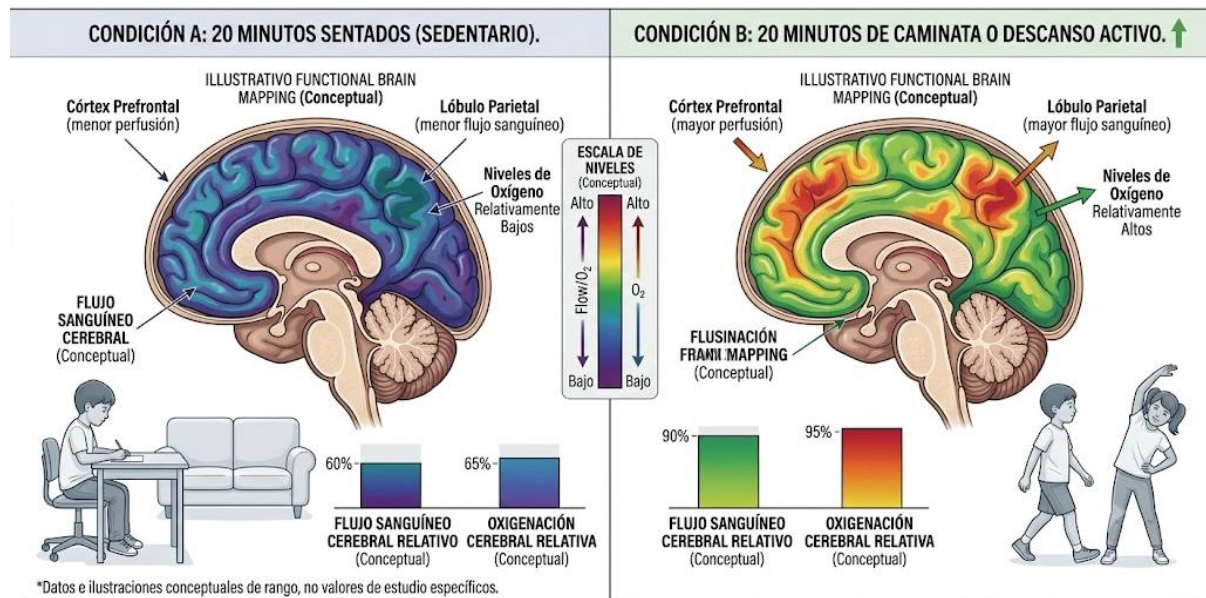
Más allá del hipocampo, el ejercicio modifica la arquitectura funcional de la corteza prefrontal. Estudios con resonancia magnética funcional realizados por Voss et al. (2022) en niños de 7 a 12 años documentaron que un programa de actividad física de 20 semanas incrementaba la activación prefrontal durante tareas de control inhibitorio tipo Flanker, y que esta mayor activación se asociaba con una reducción en los errores de comisión. La interpretación que ofrecen estos autores apunta a que el ejercicio facilita la maduración de circuitos fronto-parietales implicados en la regulación top-down de la atención, precisamente los circuitos cuyo desarrollo prolongado durante la infancia y la adolescencia los hace especialmente sensibles tanto a las experiencias enriquecedoras como a las privaciones ambientales.

Un aspecto que merece atención diferenciada es la cuestión de la dosis. No cualquier tipo ni cantidad de ejercicio produce los mismos efectos neurocognitivos. La evidencia disponible indica que el ejercicio aeróbico de intensidad moderada a vigorosa supera en beneficios cognitivos al ejercicio de baja intensidad y a las actividades exclusivamente de fuerza, aunque estas últimas también contribuyen de manera indirecta a través de la regulación metabólica y hormonal. Ludyga et al. (2022) encontraron, en un meta-análisis con 42 estudios experimentales en población escolar, que sesiones de entre 20 y 60 minutos de duración, realizadas al menos tres veces por semana, constituían el rango óptimo para observar mejoras en funciones ejecutivas. Por debajo de ese umbral, los efectos eran inconsistentes; por encima, no se observaban ganancias adicionales significativas, lo que sugiere una relación dosis-respuesta con forma de U invertida.

## 6.2. Movimiento integrado en el aula: descansos activos, aprendizaje corporizado y su impacto sobre la atención y la retención en contextos escolares

**Figura 38**

*Efecto de los Descansos Activos en las Redes de Atención*



Reconocer que el ejercicio beneficia al cerebro plantea de inmediato una pregunta operativa: ¿cómo integrar la actividad física en una jornada escolar ya saturada de contenidos curriculares? La respuesta que ha ganado mayor respaldo empírico en la última década proviene de dos estrategias complementarias: los descansos activos conocidos en la literatura anglosajona como active breaks o brain breaks y el aprendizaje corporizado o embodied learning.

Los descansos activos consisten en interrupciones breves de la actividad sedentaria académica, de entre 5 y 15 minutos de duración, durante las cuales los estudiantes realizan movimientos físicos estructurados o semiestructurados sin abandonar el aula. Watson et al. (2017) diseñaron y evaluaron el programa "Just Dance" en escuelas primarias británicas y encontraron que la introducción de pausas activas de 10 minutos entre bloques lectivos reducía los comportamientos disruptivos en un 28 % y mejoraba la precisión en tareas de atención sostenida realizadas inmediatamente después. Resultados convergentes se han obtenido en contextos latinoamericanos: Contreras-Jordán et al. (2022) implementaron un programa de descansos activos en escuelas primarias colombianas y reportaron mejoras significativas en la atención selectiva medida con el test d2-R, con tamaños del efecto mayores en los niños que

partían de niveles atencionales más bajos, lo que sugiere un efecto compensatorio particularmente relevante para estudiantes en riesgo académico.

El mecanismo neurofisiológico que explica estos efectos inmediatos del movimiento sobre la atención difiere parcialmente del que subyace a los beneficios crónicos del ejercicio aeróbico. Mientras que los efectos a largo plazo dependen de cambios estructurales mediados por neurotrofinas y neurogénesis, los efectos agudos parecen estar vinculados a la liberación transitoria de catecolaminas dopamina y norepinefrina en la corteza prefrontal, que optimizan la relación señal-ruido en circuitos atencionales (McMorris & Hale, 2012). Dicho de otro modo, el movimiento breve funciona como un regulador neuroquímico que recalibra el nivel de activación cortical, sacando al cerebro de un estado de hipoactivación causado por la sedestación prolongada y llevándolo a una zona óptima de arousal para el procesamiento cognitivo.

El aprendizaje corporizado representa una estrategia más ambiciosa que los descansos activos, puesto que no se limita a intercalar movimiento entre bloques de instrucción sino que integra el movimiento como vehículo del propio aprendizaje. La teoría de la cognición encarnada, desarrollada por Barsalou (2008) y extendida al ámbito educativo por Glenberg (2010), sostiene que los procesos cognitivos no se producen exclusivamente en circuitos cerebrales abstractos sino que están enraizados en la experiencia sensoriomotora del cuerpo. Trasladada al aula, esta perspectiva implica que un niño que aprende fracciones recortando porciones físicas de una pizza de papel y desplazándose para compararlas con las de sus compañeros no está haciendo un ejercicio recreativo decorativo: está reclutando redes neuronales sensoriomotoras que anclan la representación abstracta del número fraccionario a una experiencia corporal concreta, facilitando su codificación y posterior recuperación.

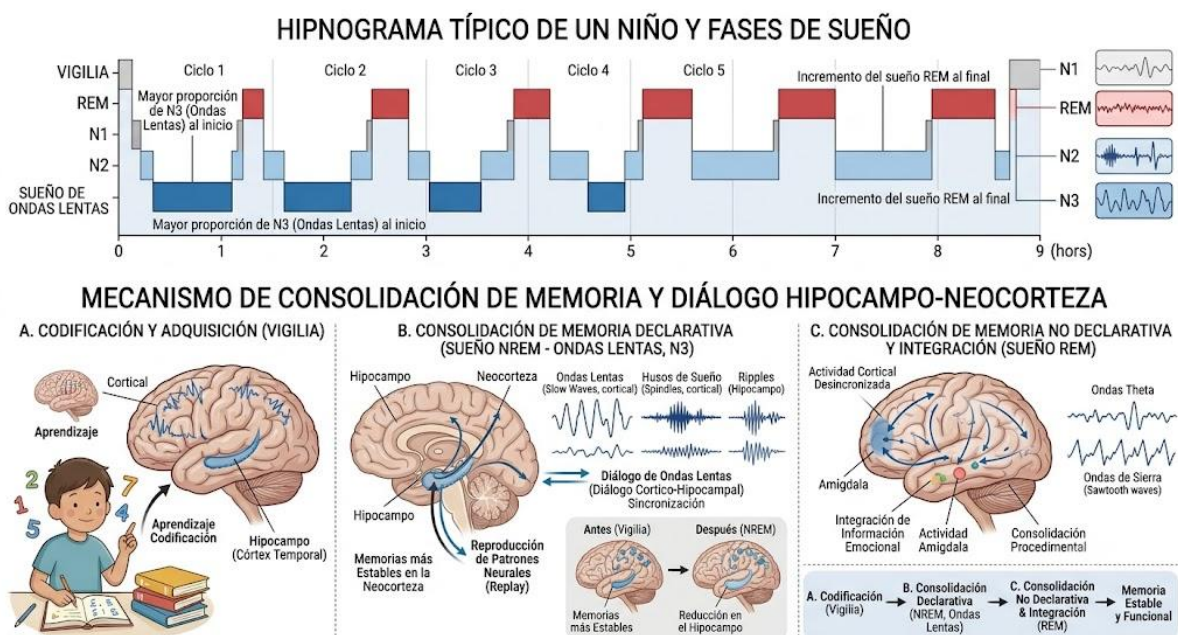
Mullender-Wijnsma et al. (2016) evaluaron los efectos de lecciones académicas físicamente activas en matemáticas y lengua durante dos años consecutivos en escuelas primarias de los Países Bajos. Los niños del grupo experimental, que realizaban operaciones matemáticas mientras ejecutaban movimientos corporales asociados saltar tantas veces como indicara el resultado de una suma, por ejemplo, mostraron ganancias significativas en velocidad de cálculo y comprensión lectora en comparación con el grupo control, que recibió la misma instrucción en formato sedentario convencional. Estos resultados fueron confirmados posteriormente por el meta-análisis de Norris et al. (2023), que analizó 21 intervenciones de aprendizaje corporizado en educación primaria y reportó un tamaño del efecto global de  $d = 0.47$  sobre el rendimiento académico, con efectos más pronunciados en matemáticas que en lectura.

Un matiz que la investigación reciente ha permitido clarificar es que no todo movimiento facilita el aprendizaje por igual. La congruencia entre el tipo de movimiento y el contenido que se está aprendiendo parece ser una variable moderadora relevante. Cuando el gesto o la acción motora guarda una relación semántica con el concepto académico como mover los brazos hacia arriba y hacia abajo para representar la suma y la resta, los efectos sobre la retención son superiores a los observados con movimientos arbitrarios no relacionados con el contenido (Mavilidi et al., 2021). Esta especificidad encaja con modelos neurocognitivos que postulan que la codificación multimodal visual, auditiva y motora simultáneamente genera representaciones mnésicas más robustas y redundantes, menos vulnerables al olvido.

### 6.3. Neurociencia del sueño infantil: arquitectura del sueño, consolidación de la memoria dependiente del sueño y ritmos circadianos en la edad escolar

**Figura 39**

*Arquitectura del sueño infantil y consolidación de la memoria*



Si la actividad física constituye uno de los moduladores más potentes del aprendizaje, el sueño representa, con toda probabilidad, el más subestimado. Cada noche, mientras el niño duerme, su cerebro ejecuta una serie de operaciones neurobiológicas que no pueden realizarse durante la vigilia y que son indispensables para que lo aprendido durante el día se transforme en conocimiento estable y recuperable. Comprender la arquitectura del sueño infantil y sus funciones cognitivas específicas permite al docente reconocer cuándo un estudiante que no

rinde está enfrentando un problema que ninguna estrategia didáctica en el aula puede resolver por sí sola.

El sueño humano se organiza en ciclos de aproximadamente 90 minutos que alternan entre dos estados fisiológicamente distintos: el sueño de ondas lentas, también denominado sueño no-REM (por sus siglas en inglés, non-rapid eye movement), y el sueño REM, caracterizado por movimientos oculares rápidos, atonía muscular y actividad electroencefalográfica similar a la vigilia. En los niños de edad escolar, que duermen entre 9 y 12 horas según las recomendaciones de la Academia Americana de Medicina del Sueño (Paruthi et al., 2016), la proporción de sueño de ondas lentas es considerablemente mayor que en los adultos, y esta predominancia tiene implicaciones directas para la consolidación de la memoria declarativa.

Los trabajos de Diekelmann y Born (2010), que constituyen una referencia seminal en este campo, establecieron que la consolidación de la memoria dependiente del sueño opera mediante un mecanismo de reactivación y redistribución: durante el sueño de ondas lentas, las memorias recientemente codificadas en el hipocampo se reactivan espontáneamente y se transfieren gradualmente a redes neocorticales distribuidas, donde se integran con conocimientos previos y adquieren mayor estabilidad. Este proceso, mediado por las oscilaciones lentas corticales, los usos del sueño tálamo-corticales y las ondas agudas hipocampales en un acoplamiento temporal preciso, transforma memorias lábiles y dependientes del hipocampo en representaciones neocorticales consolidadas y más resistentes a la interferencia.

Para la memoria procedimental el tipo de memoria que subyace al dominio de habilidades motoras y secuencias automatizadas, como la escritura cursiva o la ejecución de algoritmos aritméticos, el sueño REM parece desempeñar un papel complementario. Wilhelm et al. (2013) demostraron en niños de 8 a 11 años que una noche de sueño posterior a la práctica de una tarea de secuencia motora producía mejoras significativas en la velocidad y la precisión de la ejecución al día siguiente, mientras que un intervalo equivalente de vigilia no generaba tales ganancias. La implicación pedagógica directa, aunque a menudo ignorada en la planificación escolar, es que la práctica de habilidades nuevas rendirá mayor fruto si se realiza en las horas previas al sueño nocturno, no en las primeras horas de la mañana tras un despertar reciente.

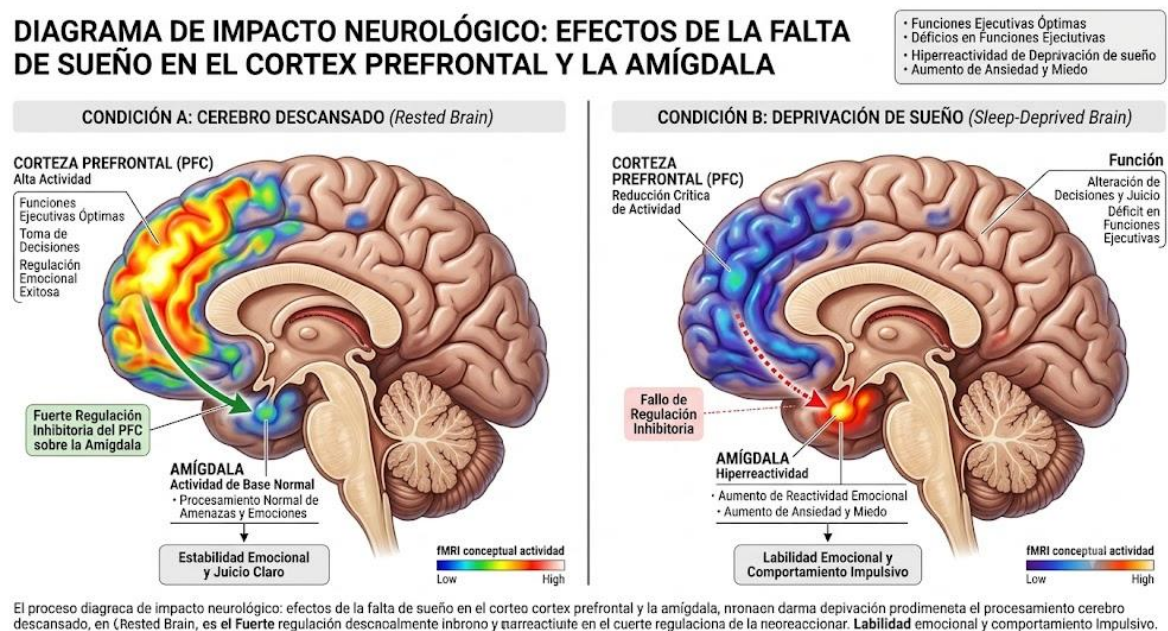
Los ritmos circadianos añaden otra capa de complejidad. El reloj biológico central, localizado en el núcleo supraquiasmático del hipotálamo, regula oscilaciones en la temperatura corporal, la secreción de cortisol y melatonina, y la predisposición fisiológica para el sueño y

la vigilia. En los niños prepúberes, el cronotipo tiende a ser matutino: la secreción de melatonina comienza temprano en la noche y la fase de alerta óptima se sitúa en las primeras horas de la mañana, lo cual es congruente con los horarios habituales de las escuelas primarias. Sin embargo, con el inicio de la pubertad se produce un retraso fisiológico en el reloj circadiano que desplaza tanto el inicio del sueño como el pico de alerta cognitiva hacia horas más tardías (Crowley et al., 2018). Este desfase tiene consecuencias que trascienden la comodidad del estudiante: cuando un adolescente temprano es obligado a iniciar actividades académicas a las 7:00 de la mañana, su corteza prefrontal opera en condiciones subóptimas, con niveles de cortisol y alerta inferiores a los que alcanzará dos o tres horas más tarde.

#### 6.4. Privación de sueño y rendimiento académico: evidencia epidemiológica y mecanismos neurobiológicos subyacentes

**Figura 40**

*Efectos neurobiológicos de la privación de sueño*



Las consecuencias cognitivas de la privación de sueño ya sea total o, más frecuentemente en el contexto escolar, parcial y crónica han sido documentadas con una consistencia que deja poco margen para la ambigüedad interpretativa. Gruber et al. (2012), en un diseño experimental con niños de 7 a 11 años, manipularon directamente la duración del sueño durante una semana: un grupo extendió su horario habitual en una hora y otro lo redujo en la misma proporción. Los profesores, ciegos a la condición experimental, calificaron a los

niños del grupo de restricción como significativamente más somnolientos, menos atentos y más irritables emocionalmente que los del grupo de extensión. Las diferencias en rendimiento atencional medidas objetivamente con tareas computarizadas replicaron estas observaciones subjetivas, confirmando que incluso una hora menos de sueño por noche, acumulada durante cinco noches consecutivas, producía deterioros funcionales mensurables.

Los mecanismos neurobiológicos que subyacen a este deterioro involucran varias vías convergentes. La privación de sueño reduce la actividad metabólica de la corteza prefrontal, la región cerebral que gobierna las funciones ejecutivas, la toma de decisiones y la regulación emocional. Estudios con neuroimagen funcional en poblaciones pediátricas han mostrado que tras una noche de sueño insuficiente se observa una hipoactivación prefrontal acompañada de una hiperactivación de la amígdala, un patrón que Yoo et al. (2007) describieron como una "desconexión funcional" entre los sistemas de control cognitivo y los sistemas de respuesta emocional. En el contexto escolar, este desacoplamiento se manifiesta como un niño que reacciona con irritabilidad desproporcionada ante la frustración, que tiene dificultades para mantener la atención en tareas que exigen esfuerzo sostenido y que muestra una capacidad reducida para inhibir respuestas impulsivas.

La evidencia epidemiológica a gran escala confirma la relación entre sueño y rendimiento académico con datos poblacionales difíciles de ignorar. Dewald et al. (2010), en un meta-análisis que incluyó 17.000 participantes de entre 8 y 18 años, encontraron una asociación moderada pero significativa entre la duración del sueño y las calificaciones escolares, con efectos más fuertes para la calidad subjetiva del sueño que para la duración total, lo que sugiere que no se trata solamente de cuántas horas duerme el niño sino de cuán reparador es ese sueño. Investigaciones más recientes han refinado estos hallazgos. Berger et al. (2022) analizaron datos de más de 8.000 niños del estudio ABCD (Adolescent Brain Cognitive Development) en Estados Unidos y documentaron que los niños que dormían menos de las nueve horas recomendadas presentaban un menor volumen de materia gris en regiones prefrontales y temporales, puntajes inferiores en tareas de memoria de trabajo y control inhibitorio, y mayores tasas de problemas emocionales y conductuales reportados por los cuidadores, incluso después de controlar por variables socioeconómicas y demográficas.

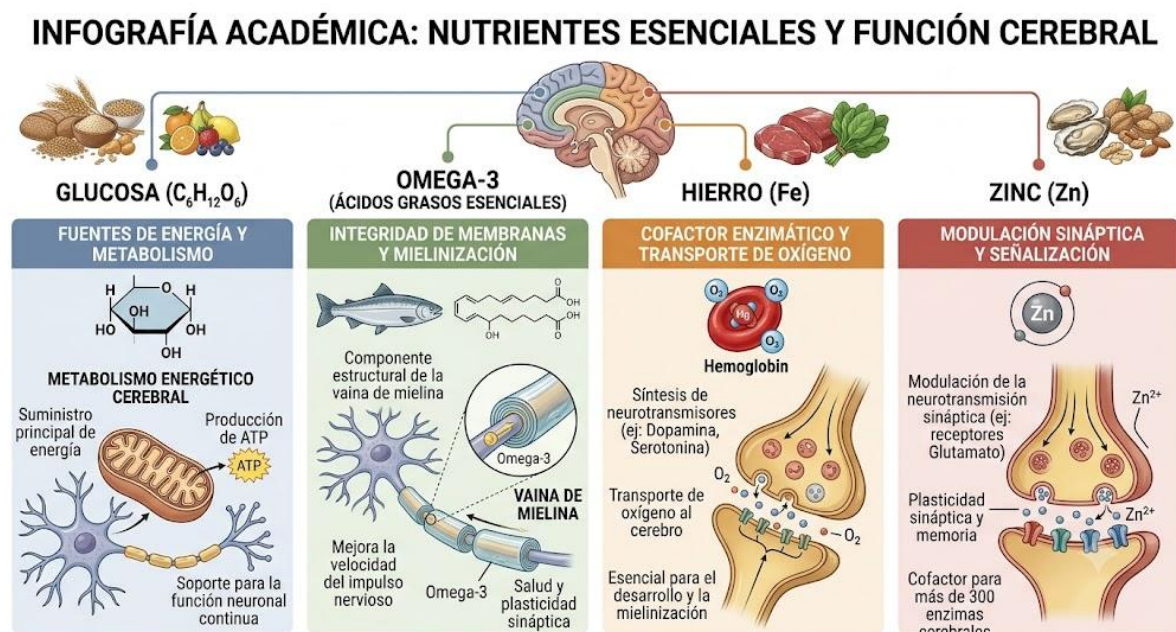
La proliferación del uso de pantallas electrónicas antes de dormir ha agravado el problema de la privación de sueño infantil de manera preocupante. La luz azul emitida por tabletas, teléfonos móviles y ordenadores suprime la secreción de melatonina, retrasando el inicio del sueño y reduciendo la duración del sueño de ondas lentas, que es precisamente la fase más crítica para la consolidación de la memoria declarativa (Hale & Guan, 2015). Guerrero

et al. (2023) estudiaron a 1.200 niños de entre 6 y 10 años en escuelas latinoamericanas y encontraron que aquellos que usaban dispositivos electrónicos durante la hora previa a acostarse dormían en promedio 42 minutos menos que sus pares sin exposición a pantallas, y que esta diferencia se traducía en puntuaciones significativamente inferiores en pruebas estandarizadas de comprensión lectora y razonamiento matemático aplicadas a la mañana siguiente. El docente, aunque no puede controlar los hábitos de sueño familiares, sí puede convertirse en un comunicador informado que oriente a las familias sobre estas evidencias durante las reuniones escolares.

## 6.5. Nutrición y función cerebral: glucosa, ácidos grasos omega-3, hierro, zinc y micronutrientes vinculados al neurodesarrollo y la cognición escolar

**Figura 41**

*Nutrientes clave para el neurodesarrollo escolar*



El cerebro humano consume aproximadamente el 20 % de la energía metabólica total del organismo, pese a representar apenas el 2 % de la masa corporal. En los niños, esta proporción es aún mayor: estudios con tomografía por emisión de positrones han estimado que el cerebro infantil entre los 4 y los 10 años consume hasta el 40-50 % de la glucosa disponible, un dato que refleja la extraordinaria demanda metabólica que impone la formación masiva de sinapsis y la mielinización progresiva de tractos de sustancia blanca durante esta etapa del desarrollo (Kuzawa et al., 2014). La consecuencia lógica de este dato es que cualquier déficit

nutricional que comprometa el suministro energético o la disponibilidad de los bloques moleculares necesarios para la construcción cerebral tendrá repercusiones cognitivas directas y, en casos severos, irreversibles.

La glucosa es el combustible primario del cerebro y su disponibilidad modula de manera inmediata el rendimiento cognitivo. Cuando los niveles de glucemia descienden como ocurre tras un ayuno nocturno prolongado en un niño que no desayuna, la corteza prefrontal es una de las primeras regiones afectadas, dado que sus circuitos glutamatérgicos son particularmente sensibles a las fluctuaciones en el suministro energético. Adolphus et al. (2016) demostraron en una revisión sistemática que el consumo de desayuno mejoraba la atención, la memoria y el rendimiento académico en niños de 4 a 14 años, con efectos más pronunciados en aquellos provenientes de familias con inseguridad alimentaria, lo que señala una intersección entre nutrición, desigualdad social y rendimiento escolar que la escuela no puede permitirse desconocer.

Más allá de la glucosa, varios micronutrientes desempeñan funciones específicas en la maduración y el funcionamiento de los circuitos cerebrales implicados en el aprendizaje. Los ácidos grasos poliinsaturados omega-3, particularmente el ácido docosahexaenoico (DHA), constituyen un componente estructural de las membranas neuronales y son necesarios para la fluidez membranal que permite el funcionamiento eficiente de receptores sinápticos y canales iónicos. Revisiones recientes han mostrado que la suplementación con omega-3 en niños con niveles basales bajos produce mejoras moderadas en atención y lectura, aunque los efectos son menos claros en niños con estatus nutricional adecuado (Montgomery et al., 2013; Chang et al., 2018).

El hierro participa como cofactor en la síntesis de dopamina y en la mielinización de axones, dos procesos directamente implicados en la atención, la motivación y la velocidad de procesamiento cognitivo. La deficiencia de hierro, incluso cuando no alcanza el umbral de anemia ferropénica, se asocia con deterioros en la memoria de trabajo y la función ejecutiva en niños escolares. Jáuregui-Lobera (2014) documentó que la anemia ferropénica en la primera infancia producía déficits cognitivos que persistían años después de la corrección del estado nutricional, lo que subraya la importancia de la prevención temprana frente a la corrección tardía. El zinc, por su parte, modula la neurotransmisión glutamatérgica en el hipocampo y se ha vinculado con la capacidad de aprendizaje y la formación de memorias espaciales (Takeda et al., 2012). Poblaciones infantiles con deficiencia de zinc muestran rendimientos inferiores en tareas de atención sostenida y memoria, efectos que mejoran parcialmente con la suplementación (Warthon-Medina et al., 2015).

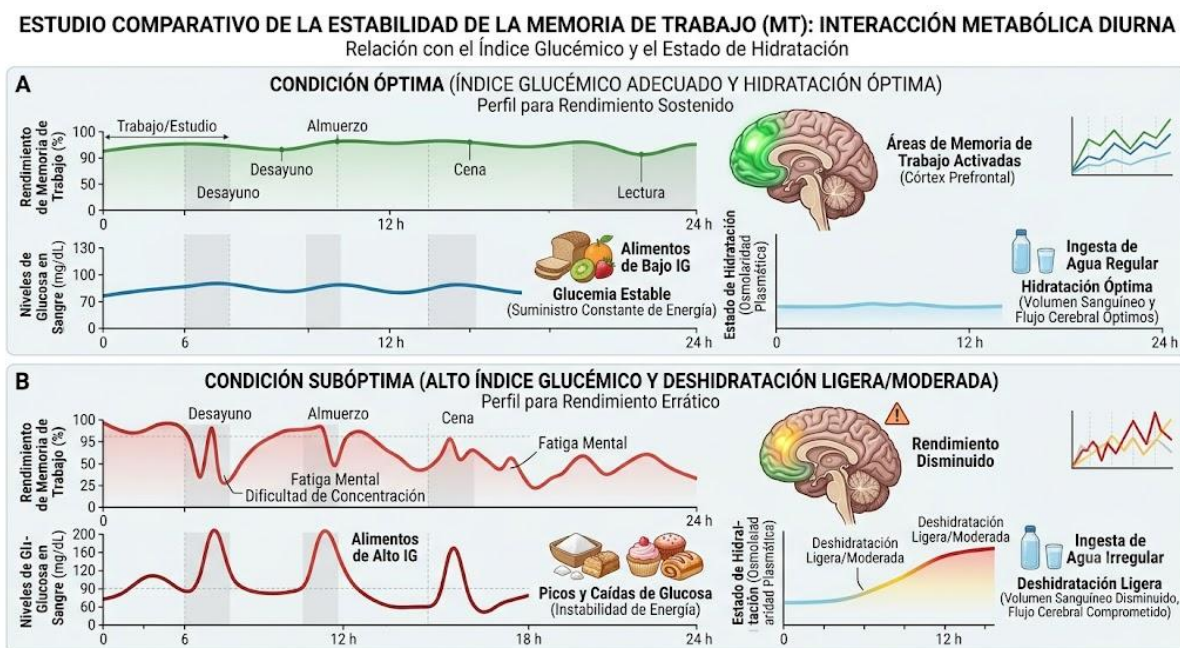
La interacción entre nutrientes introduce una complejidad que las aproximaciones reduccionistas tienden a soslayar. El cerebro no depende de un solo nutriente sino de una orquestación metabólica en la que vitaminas del grupo B, vitamina D, yodo, colina y antioxidantes operan de forma sinérgica. Georgieff et al. (2018) propusieron un modelo de "nutrientes del neurodesarrollo" que identifica ventanas temporales específicas durante las cuales determinados nutrientes ejercen efectos máximos sobre regiones y circuitos cerebrales en formación. Para el docente, la implicación práctica no consiste en prescribir suplementos tarea que corresponde a los profesionales de la salud sino en comprender que un niño crónicamente malnutrido enfrenta un obstáculo neurobiológico real para el aprendizaje que no puede resolverse exclusivamente con mejores estrategias pedagógicas.

#### **6.6. El desayuno escolar, la hidratación y los patrones alimentarios como variables de intervención educativa: evidencia y políticas públicas**

La traducción de la evidencia nutricional en acciones escolares concretas se ha materializado, en muchos países, a través de programas de alimentación escolar. El desayuno escolar, en particular, ha sido objeto de una cantidad considerable de investigación de intervención que permite evaluar su impacto con mayor rigor que los estudios observacionales. Frisvold (2015) analizó los efectos del School Breakfast Program en Estados Unidos utilizando datos longitudinales de más de 15.000 estudiantes y encontró que la participación en el programa se asociaba con mejoras significativas en las puntuaciones de matemáticas, un efecto que era particularmente marcado en las escuelas ubicadas en distritos con altos índices de pobreza. Estos resultados han sido corroborados por evaluaciones de programas similares en Chile, Brasil y México, donde la provisión de desayuno escolar universal ha demostrado reducir las brechas de rendimiento académico entre niños de diferentes estratos socioeconómicos (Jomaa et al., 2011; Gómez et al., 2022).

**Figura 42**

*Efectos de la hidratación y la glucosa sanguínea en la atención*



La composición del desayuno, y no solo su presencia, modula sus efectos cognitivos. Los desayunos con bajo índice glucémico que liberan glucosa de forma gradual y sostenida producen un perfil atencional más estable a lo largo de la mañana que los desayunos ricos en azúcares simples, que generan picos glucémicos seguidos de hipoglucemias reactivas asociadas con somnolencia y pérdida de concentración (Ingwersen et al., 2007). Este dato tiene implicaciones prácticas directas para la composición de las comidas servidas en comedores escolares: un desayuno que combine cereales integrales, proteínas y grasas saludables será más eficaz para sostener el rendimiento cognitivo matutino que uno basado en pan blanco, mermelada y zumo de fruta procesado.

La hidratación constituye otro factor fisiológico cuya influencia sobre la cognición ha sido subestimada en el entorno escolar. El cerebro es un órgano particularmente sensible a la deshidratación: reducciones del 1-2 % en el agua corporal total, que pueden ocurrir fácilmente cuando los niños no tienen acceso libre al agua durante la jornada escolar o cuando las condiciones de temperatura son elevadas, se asocian con deterioros en la atención, la memoria de trabajo y el estado de ánimo. Edmonds y Burford (2009) realizaron un estudio experimental en escuelas primarias británicas en el que proporcionaron a un grupo de niños 300 ml de agua adicional durante la mañana escolar y encontraron que estos niños mostraban un rendimiento superior en tareas de atención visual en comparación con el grupo control. Benton y Young

(2015) replicaron estos hallazgos y añadieron datos fisiológicos que indicaban que la deshidratación leve afectaba preferentemente a tareas que requieren esfuerzo cognitivo sostenido, precisamente las que predominan en el entorno académico.

La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2021) y la UNICEF (2023) han emitido directrices que recomiendan integrar políticas de nutrición y agua potable en los estándares de calidad de las escuelas, reconociendo que la infraestructura alimentaria y de hidratación escolar no es un asunto de bienestar periférico sino una condición que afecta directamente los resultados educativos. Para el docente, estas directrices se traducen en acciones concretas: permitir y fomentar el consumo de agua durante las clases, conocer los programas de alimentación disponibles en su contexto y articular con las familias para promover hábitos alimentarios que favorezcan el aprendizaje. La OECD (2021), en su informe sobre bienestar estudiantil, subrayó que las escuelas con políticas alimentarias integrales que combinan provisión de comidas saludables, educación nutricional y restricción de alimentos ultraprocesados en el entorno escolar mostraban mejores indicadores tanto de salud como de rendimiento académico en los países miembros.

### **6.7. Hacia una pedagogía del cuerpo: integrar movimiento, sueño y nutrición en la planificación docente y la política institucional**

La evidencia revisada en las secciones precedentes converge en un principio que puede parecer obvio una vez articulado, pero que las prácticas escolares dominantes contradicen con frecuencia: el rendimiento cognitivo del niño en el aula depende de las condiciones fisiológicas de su cuerpo, y la escuela tiene la capacidad y la responsabilidad de influir sobre esas condiciones. Asumir este principio implica un cambio de perspectiva que va más allá de la mera incorporación de actividades de movimiento entre clases o de recomendaciones nutricionales genéricas: requiere lo que podríamos denominar una pedagogía del cuerpo, un enfoque que reconozca al organismo del estudiante como el sustrato biológico sobre el cual se despliegan todos los procesos de aprendizaje.

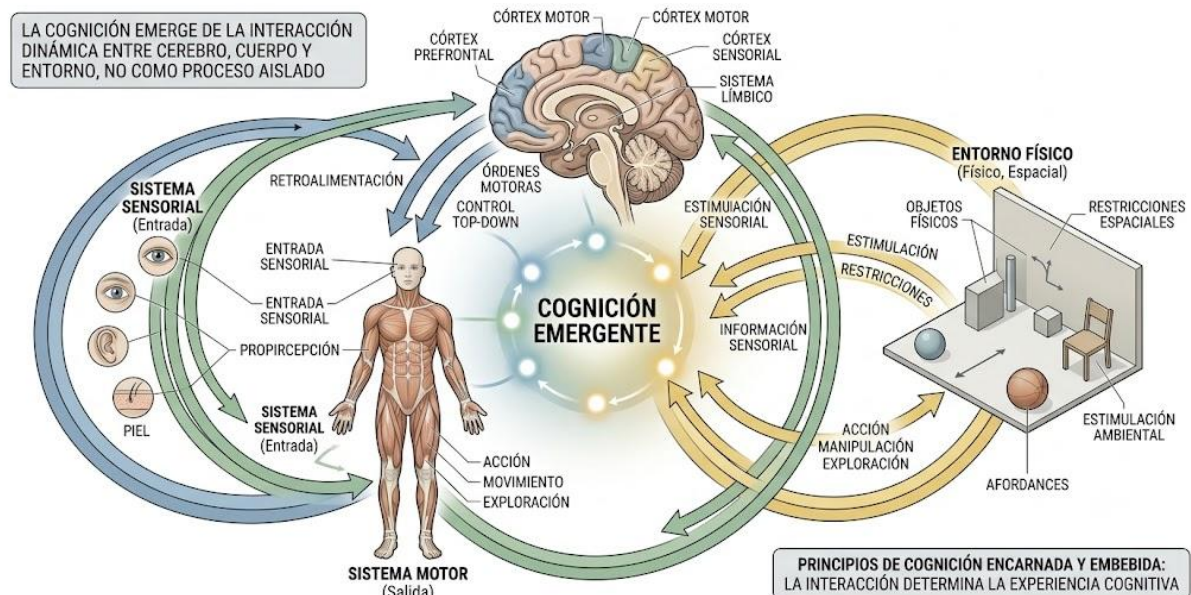
Tokuhamma-Espinosa (2019) ha argumentado que la neuroeducación debe superar el paradigma que separa lo cognitivo de lo corporal, un dualismo cartesiano que, pese a haber sido refutado filosófica y neurocientíficamente, sigue operando de manera implícita en la organización de la mayoría de los sistemas escolares. La jornada escolar típica está diseñada para un cerebro descorporizado: el niño permanece sentado durante períodos prolongados, recibe información en formato predominantemente verbal-abstracto, y sus necesidades

fisiológicas moverse, beber, ir al baño son tratadas como interrupciones que deben minimizarse en lugar de como condiciones que deben satisfacerse para que el aprendizaje ocurra.

### Figura 43

*El concepto de Aprendizaje Corporizado (Embodied Cognition)*

#### COGNICIÓN EMERGENTE: ESQUEMA DE INTERACCIÓN ACOPLADA CEREBRO-CUERPO-ENTORNO FÍSICO



Transformar esta organización requiere intervenciones en al menos tres niveles. En el nivel del aula, el docente puede introducir descansos activos cada 30-45 minutos, diseñar actividades de aprendizaje que incorporen movimiento congruente con el contenido curricular, garantizar el acceso libre al agua, y comunicar a las familias la importancia del desayuno y el sueño adecuado mediante estrategias informativas basadas en evidencia. En el nivel institucional, la escuela puede adoptar políticas de horarios que respeten los ritmos circadianos de sus estudiantes evitando, por ejemplo, programar evaluaciones o contenidos de alta demanda cognitiva en las últimas horas de la tarde cuando el nivel de alerta desciende, implementar programas de alimentación escolar con criterios nutricionales informados, y destinar espacios y tiempos para la actividad física que trasciendan la clase de educación física semanal. En el nivel de política pública, los hallazgos neurocientíficos respaldan iniciativas como el retraso del horario de inicio escolar para adolescentes, la universalización de programas de alimentación escolar, y la regulación de la publicidad de alimentos ultraprocesados dirigida a la infancia, medidas que varios países han comenzado a implementar con resultados prometedores (Patte et al., 2023).

**Figura 44**

*Decálogo de la "Pedagogía del Cuerpo" institucional*



Un programa que ilustra la viabilidad de este enfoque integrado es el desarrollado por Daly-Smith et al. (2020) en el Reino Unido, que combinó lecciones académicas físicamente activas, acceso a desayuno escolar y educación sobre higiene del sueño en un paquete de intervención multicomponente implementado durante un año escolar completo. Los resultados mostraron mejoras simultáneas en aptitud física, duración del sueño reportada, calidad de la dieta y rendimiento académico en matemáticas y lectura, con tamaños del efecto que superaban a los observados en intervenciones de componente único. Este tipo de diseños multicomponentes refleja la realidad neurobiológica de que el movimiento, el sueño y la nutrición no operan como factores independientes sino como un sistema de moduladores interconectados cuyos efectos se potencian mutuamente.

La formación docente, sin embargo, rara vez incluye estos contenidos de manera sistemática. Una encuesta realizada por Rato et al. (2023) a más de 800 docentes de educación primaria en Portugal, España y Brasil reveló que, si bien la mayoría reconocía la importancia del sueño, la nutrición y la actividad física para el aprendizaje, menos del 20 % había recibido formación específica sobre los mecanismos neurobiológicos subyacentes, y solo un 12 % reportaba implementar estrategias basadas en evidencia de manera regular. Esta brecha entre el conocimiento disponible y su aplicación en la práctica docente constituye uno de los desafíos principales que la neuroeducación debe abordar en los próximos años.

## **6.8. El cerebro no aprende solo con la mente: el cuerpo como condición de posibilidad del rendimiento cognitivo**

A lo largo de este capítulo hemos recorrido tres dimensiones de la experiencia corporal el movimiento, el sueño y la nutrición que la investigación neurocientífica contemporánea ha identificado como moduladores directos de la capacidad de aprendizaje en la infancia. La evidencia presentada no deja espacio para tratar estas variables como asuntos periféricos al hecho educativo: un niño que no duerme lo suficiente, que no se alimenta adecuadamente o que permanece inmóvil durante horas carece de las condiciones neurobiológicas básicas para que las mejores estrategias didácticas surtan efecto. Su corteza prefrontal opera con un suministro subóptimo de glucosa, neurotransmisores y neurotrofinas; su hipocampo no ha podido consolidar las memorias del día anterior; sus circuitos atencionales fluctúan entre la somnolencia y la hiperactivación reactiva. Pedirle a ese cerebro que aprenda es como pedirle a un músculo fatigado y deshidratado que rinda a su máxima capacidad.

La noción de un "cerebro que aprende solo con la mente" un cerebro desconectado de sus condiciones corporales, capaz de procesar información independientemente de si el organismo que lo alberga ha dormido, ha comido, se ha movido es una ficción funcional que ha dominado la planificación escolar durante demasiado tiempo. La neuroeducación, al reunir la evidencia sobre estos moduladores fisiológicos, ofrece al docente una perspectiva más completa y más honesta: el aprendizaje es un fenómeno biológico antes de ser un fenómeno pedagógico, y las condiciones biológicas del aprendiz no son externas al acto educativo sino constitutivas de él.

Esta comprensión abre el camino hacia el capítulo siguiente, donde abordaremos la neurodiversidad en el aula: las variaciones naturales en la arquitectura y el funcionamiento cerebral que hacen que cada estudiante procese la información, regule sus emociones y responda a las demandas académicas de manera diferente. Si el presente capítulo ha argumentado que el cuerpo es una condición del aprendizaje, el capítulo séptimo profundizará en la idea de que no todos los cerebros aprenden del mismo modo, y que reconocer esta diversidad neurológica no es solo un imperativo ético sino una necesidad pedagógica fundamentada en la ciencia del cerebro.

# **CAPÍTULO 7**

**Neurodiversidad en el aula: abordajes neuroeducativos para la atención a la diversidad funcional y los trastornos del neurodesarrollo**

## **Introducción**

El capítulo séptimo aborda la neurodiversidad como marco conceptual y como realidad cotidiana del aula de educación básica, partiendo de una premisa que la neurociencia contemporánea ha consolidado con evidencia robusta: no existe un cerebro estándar. Cada alumno que cruza la puerta del salón de clases trae consigo una arquitectura neural singular, moldeada por la genética, la experiencia prenatal, el entorno sensorial temprano y las oportunidades de aprendizaje previas. Algunos de esos cerebros han recibido etiquetas diagnósticas TDAH, autismo, dislexia, altas capacidades, pero muchos otros operan con perfiles cognitivos atípicos que nunca llegarán a un consultorio clínico y que, sin embargo, chocan a diario con un diseño escolar pensado para un alumno promedio que, como demostró Todd Rose, no existe en la práctica.

A lo largo de sus ocho secciones, el capítulo recorre los fundamentos neurobiológicos de las principales condiciones del neurodesarrollo que un docente encontrará en su práctica profesional, desde los circuitos frontoestriales implicados en el TDAH hasta la conectividad atípica del espectro autista, pasando por dificultades del aprendizaje frecuentemente invisibilizadas como la disgrafía y el trastorno del procesamiento auditivo, las necesidades desatendidas de los alumnos con altas capacidades y los efectos del bilingüismo sobre la organización cerebral. El recorrido culmina con el Diseño Universal para el Aprendizaje como propuesta integradora que traduce la investigación sobre variabilidad neural en principios curriculares aplicables. La intención no es convertir al maestro en neurólogo, sino ofrecerle herramientas conceptuales que le permitan desplazar su mirada desde el déficit hacia la diversidad funcional, comprendiendo qué ocurre en el cerebro de sus alumnos para poder responder con estrategias pedagógicas informadas y no con intuiciones bienintencionadas pero carentes de sustento.

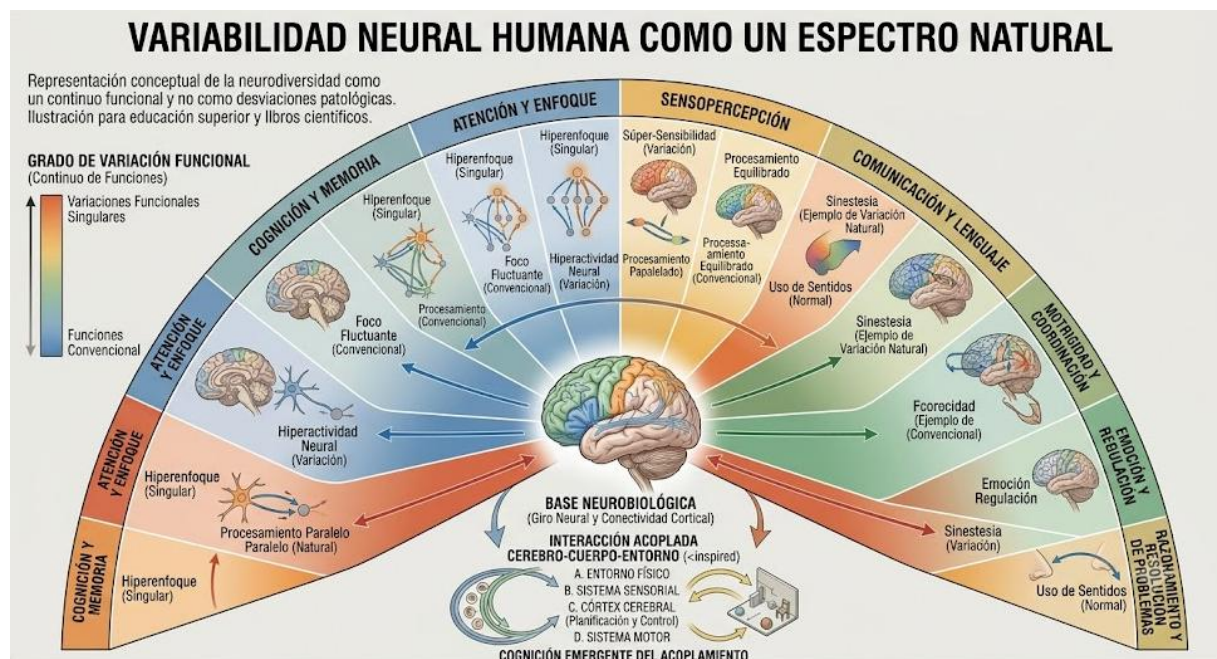
### **7.1. El paradigma de la neurodiversidad: fundamentos conceptuales, tensiones terminológicas y consecuencias para la práctica inclusiva**

Pocos conceptos han transformado con tanta fuerza el modo en que las ciencias de la educación se aproximan a las diferencias individuales como el de neurodiversidad. Acuñado por la socióloga australiana Judy Singer a finales de la década de 1990, el término nació dentro de los movimientos de autodefensa de personas autistas y proponía, con una sencillez que ocultaba implicaciones profundas, que la variación neurológica entre seres humanos constituye un hecho biológico esperable, no una desviación respecto de un supuesto cerebro normativo

(Singer, 2017). La idea caló primero en los estudios de discapacidad, después en la psicología clínica y, con cierto retraso que merece examen, en la pedagogía. Cuando hablamos de neurodiversidad no estamos haciendo referencia a un diagnóstico particular ni a una categoría clínica discreta, sino a un marco epistemológico que obliga a repensar qué entendemos por "normalidad" neurológica y, por extensión, qué espera la escuela de los cerebros que recibe cada mañana.

**Figura 45**

*El Paradigma de la Neurodiversidad*



La tensión terminológica, sin embargo, no es menor. Existe un debate vigoroso entre quienes defienden un modelo puramente afirmativo de la diferencia neurológica donde hablar de "trastorno" resulta inaceptable porque patologiza formas legítimas de funcionamiento y quienes, desde la práctica clínica y educativa, advierten que eliminar toda referencia al sufrimiento o a la limitación funcional puede desembocar en la negación de apoyos que muchos niños necesitan con urgencia (Pellicano & den Houting, 2022). Chapman (2023) ha cartografiado esta disputa con notable claridad al distinguir entre la neurodiversidad como dato ontológico los cerebros humanos son diversos, punto y el movimiento de la neurodiversidad como proyecto político orientado a la despatologización. La confusión entre ambos planos genera malentendidos frecuentes entre docentes, familias y profesionales de la salud.

Para un educador de nivel básico, la consecuencia más directa de este giro conceptual reside en la manera de interpretar las diferencias que observa en sus alumnos. Cuando un niño

no sostiene la atención durante la explicación magistral, cuando otro evita el contacto ocular, cuando una niña lee con una lentitud que desconcierta a sus compañeros, la respuesta pedagógica cambia radicalmente si el docente opera desde un modelo de déficit donde esos comportamientos señalan algo roto que debe repararse o desde un modelo de diversidad funcional, donde la pregunta se desplaza hacia las barreras que el entorno escolar impone a cerebros que procesan la información de formas distintas. Esto no significa, conviene aclararlo desde el principio, que toda dificultad sea reductible a un problema ambiental ni que los diagnósticos clínicos carezcan de utilidad; significa que el primer movimiento del educador informado en neurociencia debería ser interrogar las demandas de la tarea y del contexto antes de asumir que el problema reside exclusivamente dentro del cráneo del estudiante.

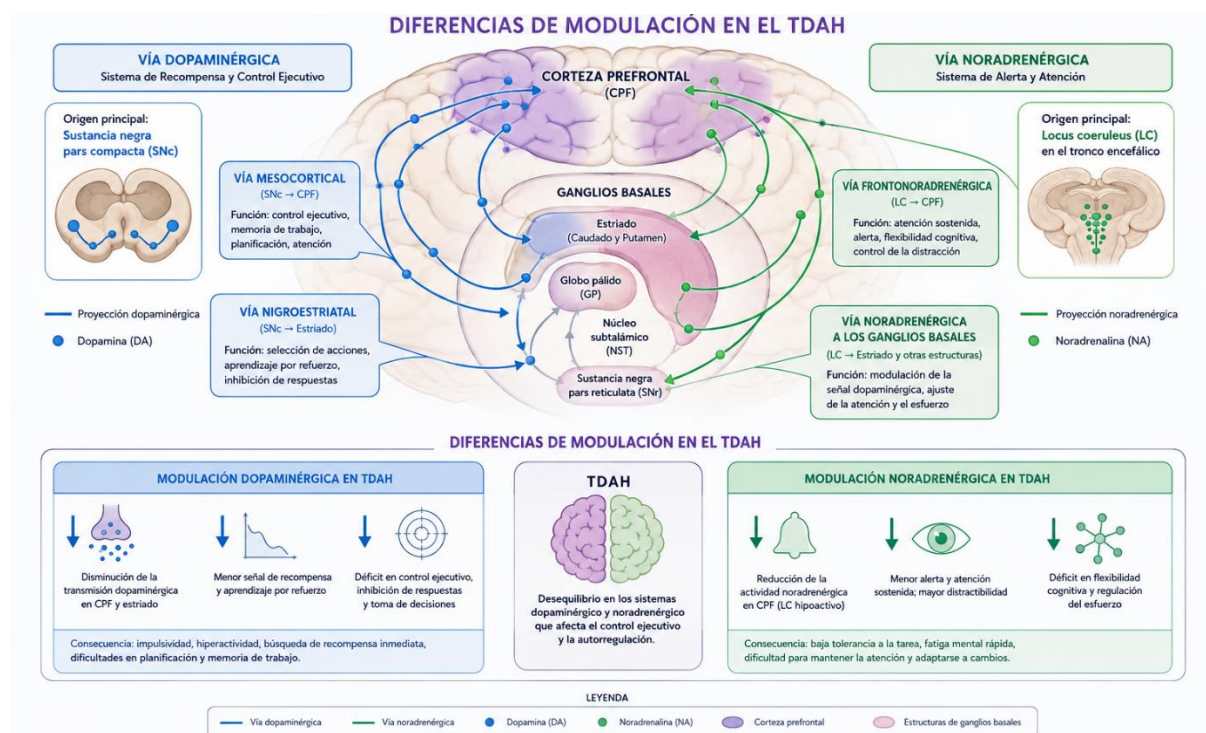
La investigación reciente ha aportado evidencia convergente desde la genética, la neuroimagen y la psicología del desarrollo que respalda una visión dimensional más que categorial de muchas condiciones del neurodesarrollo. Los límites entre el trastorno por déficit de atención con hiperactividad (TDAH), el trastorno del espectro autista (TEA), las dificultades específicas del aprendizaje y el funcionamiento considerado típico no son fronteras nítidas, sino gradientes que se solapan con frecuencia (Astle et al., 2022). Los estudios de cohorte a gran escala, como el Adolescent Brain Cognitive Development Study, han mostrado que los perfiles neurocognitivos se distribuyen en un espacio continuo donde las etiquetas diagnósticas capturan porciones reconocibles pero nunca exhaustivas de la variabilidad (Marek et al., 2022). Esta realidad dimensional tiene implicaciones curriculares directas: diseñar aulas para un alumno "promedio" es diseñar aulas que no se ajustan con precisión a casi ninguno, como argumentó con elocuencia Todd Rose (2016) en su crítica al mito del promedio.

El recorrido de este capítulo asume, pues, una posición que intenta ser honesta con la complejidad del asunto. Adoptamos el paradigma de la neurodiversidad como lente interpretativa porque la evidencia neurocientífica confirma que la variación cerebral es la norma estadística, no la excepción, pero no renunciamos al lenguaje clínico cuando este permite identificar necesidades de apoyo específicas, orientar intervenciones basadas en evidencia y facilitar el acceso a recursos que los estudiantes requieren. El desafío para el docente de educación básica consiste en habitar esa doble mirada sin que una anule a la otra.

## 7.2. Trastorno por déficit de atención con hiperactividad: neurobiología de los circuitos frontoestriatales, heterogeneidad fenotípica y estrategias de apoyo en el aula

**Figura 46**

*Neurobiología de los circuitos frontoestriatales en el TDAH*



El TDAH constituye probablemente la condición del neurodesarrollo más prevalente en las aulas de educación básica, con estimaciones que oscilan entre el 5 % y el 7 % de la población infantil a nivel mundial según los metaanálisis más rigurosos (Salari et al., 2023). Sin embargo, detrás de esa cifra aparentemente sencilla se esconde una heterogeneidad neurobiológica que los docentes rara vez llegan a comprender, porque la formación inicial suele reducir el TDAH a una tríada de síntomas inatención, hiperactividad e impulsividad sin explorar los mecanismos cerebrales que los generan ni las enormes diferencias que existen entre un niño con predominio inatento y otro con predominio hiperactivo-impulsivo.

Desde la perspectiva neurocientífica, el TDAH se ha asociado de manera consistente con alteraciones en los circuitos frontoestriatales que conectan la corteza prefrontal particularmente las regiones dorsolaterales, ventromedial y cingulada anterior con los ganglios basales, el núcleo caudado y el putamen. Los trabajos de neuroimagen funcional han revelado una hipofunción dopaminérgica en estas redes que compromete la capacidad de inhibición de respuestas prepotentes, la planificación secuencial y la regulación del esfuerzo cognitivo

sostenido (Cortese et al., 2021). Pero reducir todo el cuadro a un problema dopaminérgico frontal sería una simplificación peligrosa. Los estudios con conectividad funcional en estado de reposo han demostrado que la red de modo por defecto esa constelación de regiones que se activa cuando la mente divaga presenta un acoplamiento anómalo con la red de atención dorsal en niños con TDAH, lo que explicaría la dificultad característica para suprimir pensamientos irrelevantes durante tareas que exigen focalización (Castellanos & Aoki, 2016). Investigaciones más recientes han incorporado al cuadro alteraciones cerebelosas y en la red de saliencia, ampliando considerablemente el mapa neural del trastorno (Gehricke et al., 2021).

La heterogeneidad fenotípica merece una reflexión detenida porque tiene consecuencias pedagógicas inmediatas. El alumno con TDAH predominantemente inatento que se queda mirando por la ventana, que pierde materiales, que parece no escuchar cuando se le habla directamente, genera una preocupación muy distinta y a menudo menor que el alumno con predominio hiperactivo-impulsivo que interrumpe, se levanta del asiento y responde antes de que la pregunta haya terminado. El primero suele ser diagnosticado más tarde y recibe menos apoyos escolares, pese a que su rendimiento académico puede estar igualmente comprometido (Willcutt, 2012). Los modelos neurocognitivos actuales, como el de Sonuga-Barke et al. (2010), proponen que el TDAH no responde a un déficit unitario sino a múltiples vías causales que incluyen alteraciones en la inhibición ejecutiva, en la señalización de la recompensa y en el procesamiento temporal. Un niño puede presentar dificultades predominantes en una de esas vías, en dos, o en las tres, y la expresión comportamental variará en consecuencia.

¿Qué puede hacer un docente de educación básica con esta información? La traducción pedagógica no pasa por convertir al maestro en neurólogo, sino por comprender ciertos principios que se derivan de la neurobiología. Primero, si el cerebro con TDAH tiene dificultades con la dopamina prefrontal, las tareas que resultan intrínsecamente poco estimulantes copiar del pizarrón durante veinte minutos, escuchar una explicación monológica extensa generan un estado de infraestimulación que el niño compensará buscando novedad por su cuenta (moviéndose, distrayéndose, hablando). La estrategia consiste, entonces, en incrementar la novedad y la relevancia motivacional de las tareas: fragmentar las actividades en bloques más cortos, intercalar momentos de participación activa, ofrecer opciones dentro de la tarea, utilizar materiales multisensoriales. Segundo, si los circuitos de memoria de trabajo y planificación están comprometidos, las instrucciones largas y verbales se perderán en el camino; conviene ofrecer apoyos externos instrucciones escritas visibles, listas de verificación, organizadores gráficos que funcionen como prótesis cognitivas para las funciones ejecutivas debilitadas. Tercero, y esto es algo que la investigación subraya con insistencia, el feedback

inmediato y frecuente tiene un efecto regulador sobre el sistema de recompensa que en estos niños opera con un gradiente temporal más empinado: la recompensa demorada pierde valor con mayor rapidez que en sus pares neurotípicos (Luman et al., 2010). Reconocer el esfuerzo en el momento en que ocurre, en lugar de reservar toda la retroalimentación para la calificación final, responde a una lógica neurobiológica precisa.

Un aspecto que frecuentemente se omite en la formación docente es la coocurrencia del TDAH con otras condiciones. Los datos epidemiológicos muestran que aproximadamente dos tercios de los niños con TDAH presentan al menos una comorbilidad: trastornos del aprendizaje, ansiedad, trastorno oposicionista desafiante, dificultades de coordinación motora (Faraone et al., 2021). Esta superposición no es un accidente estadístico, sino un reflejo de la arquitectura compartida de las redes cerebrales implicadas. Para el docente, reconocer que el niño que no atiende quizá también tiene dificultades lectoras o una ansiedad que amplifica su evitación de la tarea cambia radicalmente la intervención: no basta con "sentarlo adelante y darle más tiempo", que es la prescripción genérica que muchos informes psicopedagógicos repiten con preocupante monotonía.

### **7.3. Trastorno del espectro autista: conectividad cerebral atípica, procesamiento sensorial diferenciado y diseño de entornos escolares accesibles**

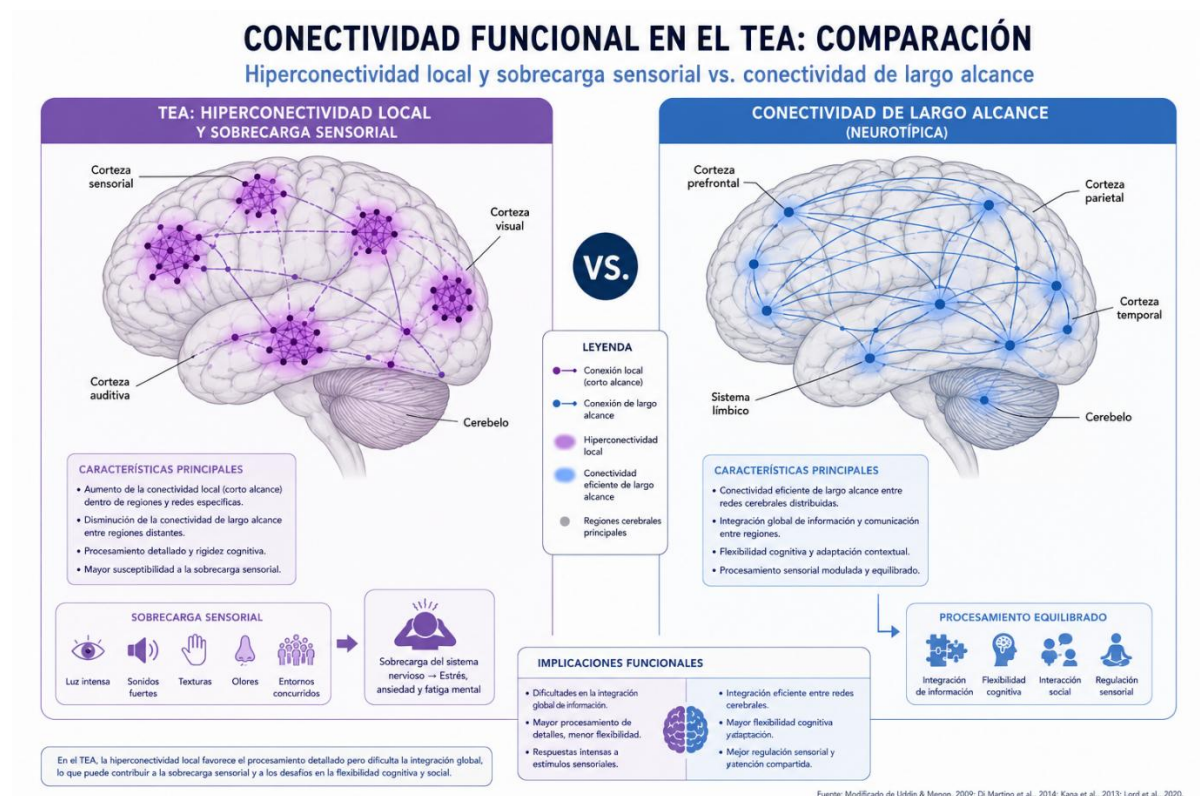
El trastorno del espectro autista ocupa un lugar singular en la conversación sobre neurodiversidad, en parte porque fue precisamente la comunidad autista la que impulsó con mayor fuerza el cambio de paradigma desde la patología hacia la diferencia. La prevalencia reportada ha crecido de forma sostenida durante las últimas dos décadas, con cifras recientes que sitúan la estimación en torno a 1 de cada 36 niños en Estados Unidos según los datos de los Centers for Disease Control and Prevention (Maenner et al., 2023), aunque parte de ese incremento refleja cambios en los criterios diagnósticos y una mayor sensibilización clínica más que un aumento real de la incidencia.

Desde el punto de vista neurobiológico, el TEA se ha conceptualizado como un trastorno de la conectividad cerebral antes que como una lesión localizada en una región específica. La hipótesis predominante sugiere un patrón de sobreconectividad local dentro de regiones corticales combinada con una infraconectividad de largo alcance entre regiones distantes (Geschwind & Levitt, 2007). Los estudios con tensor de difusión han documentado anomalías en tractos de sustancia blanca como el fascículo arcuato, el cíngulo y la cápsula interna, estructuras que median la comunicación entre áreas responsables del lenguaje, la

cognición social y la integración sensoriomotora (Solders et al., 2022). No obstante, la heterogeneidad del espectro es tan amplia que ningún perfil de conectividad único captura la realidad de todos los individuos autistas. Lombardo et al. (2019) han insistido en que el TEA agrupa, probablemente, múltiples subtipos neurobiológicos con etiologías parcialmente distintas, lo que explica por qué las intervenciones que funcionan para un niño resultan ineficaces para otro.

**Figura 47**

*Conectividad atípica y procesamiento sensorial en el TEA*



El procesamiento sensorial diferenciado constituye una de las dimensiones del autismo con mayor impacto en el contexto escolar y, paradójicamente, una de las menos atendidas en el diseño curricular. El DSM-5 incorporó la hiper o hiporreactividad sensorial como criterio diagnóstico, reconociendo lo que las personas autistas habían comunicado durante décadas: que el mundo sensorial puede resultar abrumador, insuficiente o cualitativamente distinto. Los trabajos de neuroimagen han relacionado esta experiencia con diferencias en el procesamiento multisensorial a nivel del colículo superior y la corteza insular, así como con una modulación atípica del filtrado tálamo-cortical (Green et al., 2015). La consecuencia práctica para el aula es directa y, sin embargo, frecuentemente ignorada. Un aula de educación básica típica con luces fluorescentes que parpadean a frecuencias imperceptibles para la mayoría pero

detectables para un sistema visual hipersensible, con treinta niños hablando a la vez, con olores mezclados del comedor y del material de limpieza puede constituir un entorno sensorialmente hostil para un alumno autista mucho antes de que cualquier contenido académico entre en juego.

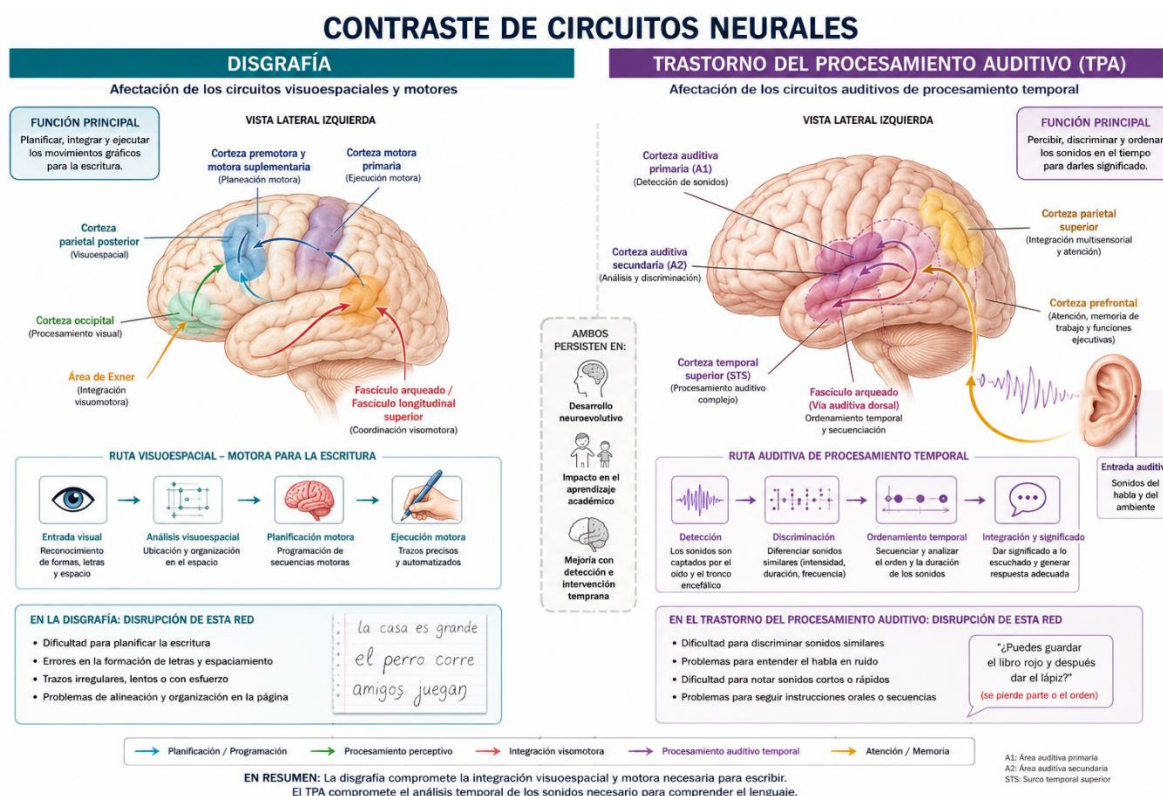
Diseñar entornos escolares accesibles para estos alumnos no requiere necesariamente inversiones millonarias, sino una comprensión de los principios sensoriales involucrados. Reducir la estimulación visual innecesaria en las paredes del aula, ofrecer opciones de iluminación menos agresiva cuando sea posible, permitir el uso de audífonos con cancelación de ruido durante el trabajo independiente, establecer un espacio de regulación sensorial al que el alumno pueda acudir cuando la sobrecarga sea inminente: todas estas medidas responden a lo que la neurociencia documenta sobre el procesamiento sensorial atípico. Mulas et al. (2022) han mostrado que la implementación de ajustes sensoriales en aulas inclusivas reduce la frecuencia de conductas de autorregulación que suelen interpretarse erróneamente como "problemas de comportamiento" aleteo de manos, balanceo, vocalizaciones, conductas que en realidad funcionan como mecanismos de modulación de la activación cortical.

La cognición social, otro eje central del perfil autista, también requiere una lectura matizada desde la neurociencia. La llamada "teoría de la mente" la capacidad de atribuir estados mentales a otros se ha asociado con la activación de la unión temporoparietal, la corteza prefrontal medial y el surco temporal superior, regiones que muestran patrones de activación atípicos en personas autistas durante tareas de mentalización (Kana et al., 2015). Pero la investigación reciente ha complejizado el panorama: el problema de la doble empatía, propuesto por Milton (2012) y respaldado por datos experimentales de Crompton et al. (2020), sugiere que las dificultades comunicativas entre personas autistas y no autistas no son unidireccionales no es solo el autista quien "falla" en leer al otro, sino bidireccionales, un desencuentro entre estilos comunicativos diferentes. Este hallazgo tiene consecuencias pedagógicas que apenas comienzan a explorarse: si la dificultad es bidireccional, la responsabilidad de la adaptación no puede recaer exclusivamente sobre el alumno autista. El docente necesita aprender a leer las señales comunicativas de ese alumno con la misma disposición con que espera ser leído.

## 7.4. Dificultades específicas del aprendizaje más allá de la dislexia y la discalculia: disgrafía, trastorno del procesamiento auditivo y perfiles neurocognitivos mixtos

**Figura 48**

*Perfiles neurocognitivos de la Digráfica y el TPA*



La dislexia y la discalculia han acaparado la mayor parte de la atención investigadora dentro del campo de las dificultades específicas del aprendizaje, y con razón: afectan a habilidades nucleares para el desempeño académico y cuentan con una base neurocientífica relativamente bien delimitada, como se exploró en el capítulo quinto de este libro. Pero el aula de educación básica alberga también perfiles de dificultad menos estudiados y, por ello, peor comprendidos y atendidos: la disgrafía, el trastorno del procesamiento auditivo central y una constelación de perfiles neurocognitivos mixtos que no encajan con limpieza en ninguna categoría diagnóstica única.

La disgrafía, entendida como una dificultad persistente en la producción de escritura manuscrita que no puede explicarse por déficits intelectuales, motores generales ni por falta de instrucción, implica alteraciones en la coordinación entre los programas motores almacenados en el cerebelo y el área premotora, la retroalimentación propioceptiva de la mano y los dedos, y la representación grafomotora del lenguaje a nivel cortical. Los estudios con resonancia

magnética funcional han identificado una menor activación de la circunvolución frontal inferior izquierda y del cerebelo durante tareas de escritura en niños con disgrafía en comparación con controles (Richards et al., 2015). Lo que esto significa en términos escolares es que el niño con disgrafía no es "perezoso" ni "descuidado": su cerebro ejecuta el acto motor de escribir con un coste cognitivo desproporcionado, lo que le deja menos recursos atencionales disponibles para la composición del contenido. Obligar a ese niño a copiar páginas enteras como estrategia de mejora constituye una práctica que contradice la evidencia neurocientífica: lo que necesita es una combinación de instrucción explícita en formación de letras, reducción de la carga de escritura manuscrita cuando el objetivo de la tarea es evaluar contenido, y acceso progresivo a herramientas de escritura digital.

El trastorno del procesamiento auditivo central representa un desafío diagnóstico considerable porque sus síntomas dificultad para seguir instrucciones verbales en ambientes ruidosos, confusión entre sonidos similares, problemas para comprender el habla rápida se solapan con los del TDAH y con los de ciertas dificultades del lenguaje. A nivel neural, el trastorno se asocia con un procesamiento ineficiente en la corteza auditiva primaria y en las áreas de asociación auditiva del lóbulo temporal, así como con una maduración retardada de las vías auditivas del tronco cerebral (Iliadou et al., 2023). Los potenciales evocados auditivos, particularmente el complejo P1-N1-P2 y la respuesta de seguimiento de la frecuencia fundamental, han mostrado diferencias consistentes entre niños con y sin trastorno del procesamiento auditivo, lo que sugiere que el cerebro de estos niños codifica la señal acústica del habla de manera menos precisa (Sharma et al., 2022). En el aula, esto se traduce en que el niño parece "no escuchar" o "no entender" a pesar de tener una audición periférica normal. Las orientaciones basadas en la evidencia incluyen el uso de sistemas de frecuencia modulada que amplifican la voz del docente respecto del ruido de fondo, la reducción de la reverberación en el aula mediante paneles acústicos, la utilización de apoyos visuales que complementen la información auditiva y la evitación de instrucciones exclusivamente orales para contenidos complejos.

Quizá el problema más acuciante para el docente de educación básica no sea, empero, ninguna de estas condiciones aisladas, sino la alta frecuencia de perfiles neurocognitivos mixtos que desafían las fronteras diagnósticas convencionales. Un porcentaje considerable de niños con dificultades de aprendizaje presenta déficits que atraviesan múltiples dominios: un alumno puede mostrar dificultades lectoras combinadas con problemas de memoria de trabajo visoespacial y con una torpeza motora fina que afecta a su escritura. La propuesta transdiagnóstica de Astle et al. (2022) argumenta que muchas dificultades del neurodesarrollo

comparten alteraciones en dimensiones cognitivas comunes funciones ejecutivas, velocidad de procesamiento, memoria fonológica y que la asignación a categorías diagnósticas discretas puede oscurecer más de lo que ilumina. Para el aula, la implicación práctica es que el apoyo debe responder al perfil funcional del niño, no solo a la etiqueta diagnóstica. Un plan de intervención que diga "tiene dislexia, por lo tanto aplicar adaptaciones para dislexia" fracasará si no considera que ese niño concreto también presenta déficits atencionales y dificultades de coordinación motora que interactúan con su problema lector de formas específicas.

### 7.5. Altas capacidades intelectuales: mitos neurocientíficos, características reales de la organización cerebral y necesidades educativas frecuentemente desatendidas

**Figura 49**

*Organización cerebral en Altas Capacidades Intelectuales*



La conversación sobre neurodiversidad en el aula quedaría incompleta y sesgada si se limitara a las condiciones que suponen dificultades funcionales sin abordar el otro extremo del espectro de la variación cognitiva. Los alumnos con altas capacidades intelectuales constituyen una población neurodiversa cuyas necesidades educativas suelen quedar desatendidas bajo el

supuesto erróneo de que "si son tan inteligentes, se las arreglarán solos". La investigación neurocientífica de las últimas dos décadas ha desmentido varios mitos populares sobre el cerebro de estos niños y ha proporcionado una base para comprender por qué muchos de ellos, lejos de prosperar automáticamente, experimentan aburrimiento crónico, desmotivación, problemas socioemocionales y, en casos no infrecuentes, fracaso escolar.

El mito más persistente es el de que las personas con altas capacidades "usan más su cerebro" o "utilizan áreas cerebrales que el resto no usa". La realidad es más sutil e interesante. Los estudios de neuroimagen han documentado que los individuos con cocientes intelectuales elevados tienden a mostrar una mayor eficiencia neural no una mayor activación durante tareas cognitivas de dificultad moderada: sus cerebros alcanzan el mismo resultado con menor gasto metabólico, lo que se refleja en menores niveles de activación cortical (Neubauer & Fink, 2009). Sin embargo, cuando la dificultad de la tarea aumenta, sus cerebros muestran una mayor capacidad de reclutamiento de áreas prefrontales y parietales, y una integración funcional más robusta entre redes de largo alcance. Hay un dato particularmente revelador: los estudios longitudinales de Shaw et al. (2006), que siguieron el desarrollo cortical de niños con distintos niveles de cociente intelectual, encontraron que la diferencia principal no radicaba en el grosor cortical per se, sino en la trayectoria de desarrollo: los niños con capacidades superiores mostraban un engrosamiento cortical prolongado seguido de un adelgazamiento acelerado durante la adolescencia, un patrón que sugiere una poda sináptica más selectiva y eficiente.

Otro mito que conviene desmontar es la identificación automática de altas capacidades con rendimiento escolar sobresaliente. Renzulli (2021) ha insistido durante décadas en que la capacidad intelectual es una condición necesaria pero no suficiente para el desempeño excepcional, que requiere además compromiso con la tarea y creatividad aplicada. Los estudios neuropsicológicos han revelado que un subgrupo significativo de niños con altas capacidades presenta la denominada doble excepcionalidad: coexistencia de un potencial cognitivo elevado con una condición del neurodesarrollo como TDAH, TEA, dislexia o trastornos emocionales (Pfeiffer, 2022). Estos niños constituyen un enigma pedagógico porque sus fortalezas cognitivas compensan parcialmente sus dificultades, enmascarando tanto la alta capacidad como el trastorno: no rinden lo suficiente para ser identificados como dotados, pero no fracasan lo bastante para recibir un diagnóstico o un apoyo específico. Foley-Nicpon et al. (2021) han señalado que estos alumnos doblemente excepcionales son los más subidentificados y subatendidos de todo el espectro de necesidades educativas especiales.

Las necesidades educativas de los niños con altas capacidades que la neurociencia permite fundamentar van más allá del enriquecimiento temático superficial que suelen ofrecer

los programas escolares. Si el cerebro de estos alumnos opera con mayor eficiencia neural y requiere niveles más altos de complejidad para activar las redes prefrontales de control ejecutivo, entonces las tareas rutinarias y repetitivas no solo los aburren: literalmente subactivan las regiones cerebrales responsables de la atención sostenida y la motivación, generando un estado de desenganche cognitivo que puede desembocar en problemas conductuales o en retraimiento emocional. La respuesta pedagógica debería incluir compactación curricular eliminar la práctica repetitiva de contenidos ya dominados, acceso a problemas abiertos y complejos que exijan razonamiento de alto nivel, oportunidades de profundización autónoma en áreas de interés y, especialmente, atención al bienestar socioemocional, porque la asincronía entre el desarrollo intelectual y el desarrollo emocional de estos niños genera tensiones internas que la escuela rara vez reconoce.

#### **7.6. El cerebro bilingüe y multilingüe en contextos de diversidad lingüística: ventajas ejecutivas, costes de procesamiento y orientaciones para aulas plurilingües**

América Latina, con su extraordinaria diversidad lingüística lenguas originarias que conviven con el español en contextos de bilingüismo aditivo, sustractivo y, cada vez más, con lenguas de migración reciente, constituye un laboratorio natural para estudiar los efectos de la experiencia bilingüe sobre el desarrollo cerebral. La neurociencia del bilingüismo ha avanzado considerablemente desde los primeros trabajos de Ellen Bialystok, pero también ha tenido que matizar afirmaciones inicialmente demasiado entusiastas sobre la llamada "ventaja bilingüe" en funciones ejecutivas.

El panorama que emerge de la investigación reciente es más complejo de lo que las simplificaciones mediáticas sugieren. Los estudios de neuroimagen estructural han documentado de manera consistente que la experiencia bilingüe se asocia con diferencias en la densidad de materia gris en regiones implicadas en el control cognitivo, particularmente la corteza cingulada anterior, la corteza prefrontal dorsolateral y el núcleo caudado (DeLuca et al., 2020). Estas diferencias reflejan la demanda constante que el cerebro bilingüe enfrenta al gestionar dos sistemas lingüísticos: seleccionar el idioma apropiado al contexto, inhibir la intrusión del idioma no deseado y alternar entre ambos según las señales sociales. Este ejercicio continuo de control ejecutivo lo que Green y Abutalebi (2013) denominaron el "modelo de control adaptativo" genera adaptaciones neuroplásticas mensurables.

**Figura 50**

*Redes cerebrales del cerebro Bilingüe*



La controversia sobre la ventaja ejecutiva del bilingüismo merece un tratamiento honesto. Mientras que algunos metaanálisis recientes han cuestionado la robustez y la generalización del efecto en tareas de laboratorio estandarizadas (Lehtonen et al., 2018), otros han señalado que la ventaja puede ser más evidente en tareas ecológicamente válidas que demandan control atencional en contextos naturales, y que los efectos están modulados por variables como la edad de adquisición de la segunda lengua, la frecuencia de uso y el grado de competencia en ambos idiomas (Bialystok, 2021). Lo que parece fuera de discusión es que el bilingüismo temprano modifica la organización funcional del cerebro de maneras que son relevantes para el aprendizaje escolar, independientemente de si eso se traduce o no en una ventaja medible en tareas de inhibición de tipo flanker.

Al mismo tiempo, la investigación no ignora los costes cognitivos del procesamiento bilingüe. Los hablantes bilingües muestran, en promedio, vocabularios más pequeños en cada una de sus lenguas en comparación con monolingües, un fenómeno que Marchman et al. (2023) han documentado longitudinalmente y que refleja la distribución de la experiencia lingüística entre dos sistemas. En el aula, esto puede generar malentendidos peligrosos: un niño bilingüe cuyo vocabulario en español parece limitado puede ser erróneamente referido para evaluación

de trastorno del lenguaje cuando, en realidad, su competencia lingüística total sumando ambas lenguas es perfectamente adecuada. La orientación neuroeducativa para contextos plurilingües pasa por comprender que el cerebro bilingüe no contiene dos monolingües empaquetados por separado, sino un sistema integrado donde ambas lenguas interactúan, compiten y se enriquecen mutuamente. El aula debería permitir la activación de todo el repertorio lingüístico del alumno lo que García y Wei (2014) denominan translanguaging en lugar de exigir una separación rígida entre lenguas que contradice la arquitectura neural del bilingüismo.

Para los docentes que trabajan con niños hablantes de lenguas indígenas en proceso de adquisición del español como segunda lengua, la evidencia neurocientífica ofrece un argumento poderoso contra las prácticas de sumersión lingüística que todavía persisten en muchos sistemas educativos: forzar la transición abrupta a la lengua dominante sin apoyo en la lengua materna no solo perjudica el desarrollo lingüístico, sino que desaprovecha las redes neurales ya establecidas para la primera lengua, redes que podrían servir como andamiaje para la adquisición de la segunda (Cummins, 2021).

### **7.7. Diseño universal para el aprendizaje como marco neuroeducativo: principios, redes cerebrales implicadas y aplicación curricular**

Si la diversidad cerebral es la norma, entonces el diseño curricular debería partir de esa diversidad como supuesto de base, no como excepción que requiere adaptaciones posteriores. Esta es, en esencia, la proposición del Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), un marco desarrollado originalmente por el Center for Applied Special Technology (CAST) que se fundamenta explícitamente en la neurociencia de las redes cerebrales y que ha ganado una presencia creciente en las políticas educativas de numerosos países (CAST, 2018).

El DUA se organiza alrededor de tres principios que se corresponden con tres grandes redes neurales implicadas en el aprendizaje. El primer principio proporcionar múltiples formas de representación se vincula con las redes de reconocimiento, localizadas predominantemente en las regiones posteriores del cerebro (lóbulos occipital, temporal y parietal), responsables de percibir, identificar y categorizar la información entrante. El segundo principio proporcionar múltiples formas de acción y expresión se relaciona con las redes estratégicas, ancladas en las áreas frontales del cerebro (corteza motora, premotora y prefrontal), que gobiernan la planificación, la ejecución y el monitoreo de las acciones. El tercer principio proporcionar múltiples formas de implicación conecta con las redes afectivas, centradas en estructuras

límbicas y paralímbicas (amígdala, hipotálamo, corteza insular, corteza cingulada), que modulan la motivación, el interés y la regulación emocional (Meyer et al., 2014).

La elegancia del modelo reside en que ofrece un lenguaje compartido entre neurociencia y pedagogía que permite al docente comprender por qué una misma estrategia no funciona para todos: porque los cerebros de sus alumnos difieren en cómo perciben la información, en cómo planifican y ejecutan respuestas, y en qué los motiva y los sostiene emocionalmente. Cuando un docente presenta un contenido exclusivamente a través de texto escrito, está apostando todo a un canal de las redes de reconocimiento; si un alumno tiene debilidades en el procesamiento fonológico o en la decodificación visual, esa apuesta fracasará. Complementar con representaciones visuales, auditivas, manipulativas o digitales no es un "extra" para niños con dificultades; es un principio de diseño que reconoce la variabilidad neural como condición universal.

Sin embargo, la implementación del DUA presenta retos que conviene abordar con franqueza. Rao et al. (2023) han señalado que muchas de las interpretaciones escolares del DUA reducen el marco a "ofrecer opciones", vaciándolo de su fundamentación neurocientífica y convirtiéndolo en un eslogan bien intencionado pero superficial. La profundidad del DUA exige que el docente no solo ofrezca múltiples medios, sino que comprenda cuáles son las barreras cognitivas específicas de cada tarea y cómo los distintos formatos de presentación, expresión e implicación interactúan con los perfiles neurocognitivos de sus alumnos. Una implementación genuina del DUA requiere formación docente sostenida, acompañamiento pedagógico y tiempo para el diseño curricular, recursos que rara vez están disponibles en los contextos donde más se necesitan.

Desde la perspectiva de la neuroeducación, el DUA representa probablemente el puente más sólido entre la investigación sobre diversidad cerebral y la práctica de aula a gran escala. A diferencia de las adaptaciones individuales, que siempre llegan después del fracaso y con frecuencia estigmatizan al alumno que las recibe, el DUA actúa de manera proactiva, diseñando el entorno de aprendizaje para que funcione desde el inicio para el mayor rango posible de variabilidad. Esto no elimina la necesidad de apoyos individualizados para alumnos con necesidades específicas intensas: un niño con autismo de alto requerimiento de apoyo necesitará intervenciones que excedan lo que el DUA puede ofrecer, pero reduce drásticamente la cantidad de estudiantes que requieren esas adaptaciones porque el diseño base ya contempla la diversidad.

Griful-Freixenet et al. (2021) han aportado evidencia empírica prometedora sobre los efectos del DUA en contextos inclusivos, mostrando que su aplicación se asocia con mejoras

en la participación académica, la motivación intrínseca y los resultados de aprendizaje tanto en alumnos con necesidades específicas como en aquellos sin diagnóstico alguno. Este dato es particularmente importante para contrarrestar la resistencia que algunos docentes manifiestan ante enfoques inclusivos bajo el argumento de que "beneficiar a unos perjudica a otros": la evidencia disponible indica que un diseño curricular flexible beneficia al conjunto, no porque baje las expectativas, sino porque diversifica las vías de acceso al aprendizaje.

## **7.8. Cierre del capítulo. La diversidad cerebral como norma y no como excepción: reconfigurar la mirada docente**

El recorrido por los distintos perfiles neurocognitivos que pueblan un aula de educación básica TDAH, autismo, dificultades específicas del aprendizaje, altas capacidades, bilingüismo podría generar en el docente una sensación de abrumamiento comprensible. Si cada cerebro es diferente, si las categorías diagnósticas se solapan y difuminan, si los perfiles mixtos son más la regla que la excepción, ¿cómo puede un solo maestro, con treinta alumnos y recursos limitados, responder a semejante complejidad?

La respuesta no pasa por convertir al docente en un neuropsicólogo que diagnostica ni en un terapeuta que interviene clínicamente. Pasa por un cambio de mirada que la neurociencia fundamenta con solidez: abandonar el supuesto de que existe un alumno estándar para el cual se diseña la enseñanza y al cual los demás deben aproximarse, y sustituirlo por la comprensión de que la variabilidad es la propiedad más predecible del cerebro humano. Cada capítulo de este libro ha abonado esa idea desde distintas perspectivas: la plasticidad sináptica que hace que cada experiencia modifique de forma única la arquitectura cerebral, los períodos sensibles que generan ventanas de oportunidad distintas para distintos aprendizajes, las diferencias individuales en los sistemas atencional, ejecutivo y emocional. La neurodiversidad no es un capítulo aparte; es la consecuencia lógica de todo lo anterior.

Reconfigurar la mirada docente implica tres desplazamientos conceptuales que merecen ser explicitados. El primero: desplazar la pregunta desde "¿qué tiene este niño?" hacia "¿qué necesita este niño y qué barreras le impone el entorno actual?". El segundo: aceptar que los apoyos no son concesiones que se otorgan a unos pocos, sino condiciones de accesibilidad que deberían formar parte del diseño de base, del mismo modo en que una rampa en la entrada de un edificio no beneficia solo a los usuarios de silla de ruedas sino también a quien empuja un cochecito o arrastra una maleta. El tercero: reconocer que la experticia sobre la experiencia neurodivergente reside también y quizás primariamente en las propias personas que la viven,

lo que incluye escuchar a los alumnos cuando expresan qué les ayuda y qué les dificulta el aprendizaje, en lugar de asumir que solo el profesional externo tiene la autoridad para prescribir.

El capítulo siguiente explorará cómo estos principios se materializan en el diseño concreto de ambientes de aprendizaje neurocompatibles, llevando la discusión desde los perfiles individuales hacia la arquitectura física, sensorial, social y curricular del espacio escolar. Si este capítulo ha argumentado que la diversidad cerebral es la norma, el próximo se ocupará de responder a la pregunta operativa que le sigue: ¿cómo se construye un aula que honre esa norma en la práctica cotidiana?

# **CAPÍTULO 8**

**Diseño de ambientes de aprendizaje neurocompatibles: del mobiliario al currículo  
basado en el cerebro**

## **Introducción**

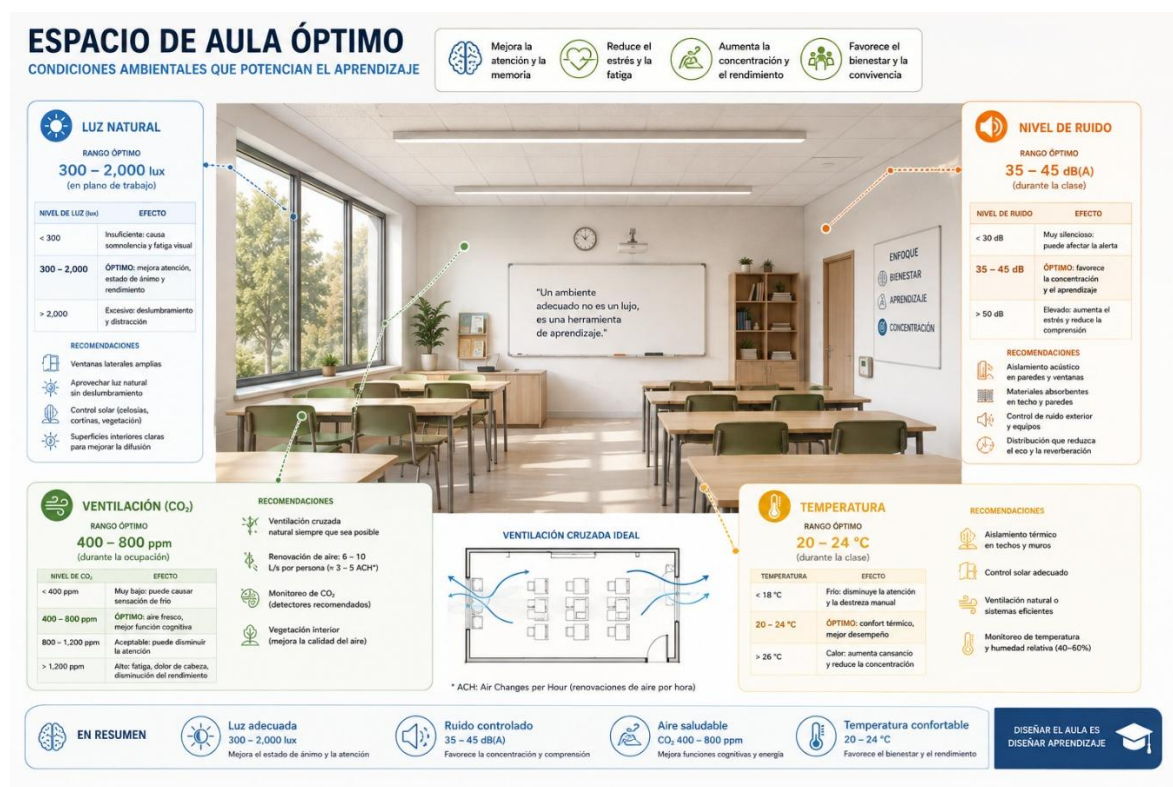
El recorrido trazado en los capítulos precedentes ha examinado los mecanismos neurobiológicos del aprendizaje infantil desde la sinapsis hasta la emoción, desde la plasticidad cerebral hasta los moduladores fisiológicos del rendimiento cognitivo. Cada uno de esos hallazgos cobra sentido práctico solo cuando se materializa en un espacio concreto: el aula donde un docente y un grupo de niños comparten varias horas diarias durante años formativos irrepetibles. Este capítulo final aborda precisamente esa materialización. La pregunta que lo vertebra no es abstracta sino operativa: ¿cómo debería configurarse el entorno físico, tecnológico, curricular y evaluativo de un aula de educación básica para que sus características sean compatibles y no antagónicas con lo que la neurociencia ha documentado sobre el funcionamiento del cerebro que aprende? El recorrido avanza desde las variables ambientales más tangibles (luz, sonido, temperatura, aire) hasta las decisiones pedagógicas menos visibles pero igualmente determinantes (secuenciación didáctica, formatos de evaluación, formación del propio docente), con la convicción de que un ambiente genuinamente neurocompatible no se reduce a un mobiliario bien elegido, sino que integra coherentemente cada dimensión del espacio escolar con los principios que este libro ha expuesto.

### **8.1. ¿Qué es un ambiente neurocompatible? Definición operativa, criterios de diseño y evidencia disponible sobre el efecto del entorno físico en la cognición infantil**

Toda experiencia de aprendizaje ocurre en un lugar, y ese lugar no es neutral. El cerebro humano, modelado por millones de años de presión selectiva, responde con sensibilidad extraordinaria a las condiciones del entorno inmediato: la cantidad de luz que incide sobre la retina modifica los niveles de cortisol y melatonina; el ruido de fondo compite con la señal lingüística que el docente intenta transmitir; la temperatura corporal condiciona la tasa metabólica del tejido cortical y, con ella, la capacidad de sostener la atención. Cuando hablamos de un ambiente neurocompatible, nos referimos a un espacio físico y social cuyas características han sido deliberadamente diseñadas o, al menos, ajustadas para favorecer los procesos neurocognitivos que subyacen al aprendizaje escolar, en lugar de obstaculizarlos. La definición, que puede parecer obvia, encierra una exigencia metodológica nada trivial: requiere que las decisiones sobre el aula se fundamenten en evidencia empírica acerca de cómo el cerebro infantil procesa información, regula emociones y consolida memorias, y no únicamente en tradiciones arquitectónicas, restricciones presupuestarias o preferencias estéticas del equipo docente.

**Figura 51**

*Factores ambientales con impacto neurocognitivo en el aula*



El proyecto HEAD (Holistic Evidence and Design), dirigido por Peter Barrett y su equipo en la Universidad de Salford, constituye la investigación de mayor escala realizada hasta la fecha sobre la relación entre diseño del aula y rendimiento académico en educación primaria. Barrett et al. (2015) analizaron 153 aulas de 27 escuelas en tres regiones del Reino Unido, vinculando mediciones detalladas de las características físicas de cada espacio con los datos de progreso académico de 3766 alumnos durante un año lectivo. El hallazgo principal que las diferencias en el diseño físico del aula explican hasta un 16% de la variación en el progreso de aprendizaje de los estudiantes transformó un campo hasta entonces dominado por intuiciones en un territorio con datos cuantificables. Lo que el estudio HEAD reveló con claridad es que el entorno construido no opera como un fondo decorativo, sino como una variable moderadora del desempeño cognitivo, organizada en torno a tres principios que Barrett y sus colaboradores denominaron naturalidad, individualización y estimulación (Barrett et al., 2017).

La naturalidad comprende factores ligados a las necesidades fisiológicas básicas del organismo: luz natural, temperatura, calidad del aire y conexión con elementos del medio natural. La individualización se refiere a la posibilidad de que el espacio se adapte a las

necesidades del usuario, ofreciendo flexibilidad en la disposición del mobiliario y un sentido de pertenencia. La estimulación, por su parte, alude al nivel de complejidad visual del entorno, incluyendo color, variedad de materiales y grado de ornamentación. Estos tres ejes no funcionan de manera aditiva simple; su interacción genera efectos no lineales que el modelo multinivel de Barrett logró capturar estadísticamente.

Ahora bien, la noción de neurocompatibilidad trasciende la mera enumeración de parámetros ambientales. Un ambiente neurocompatible presupone coherencia entre las condiciones físicas del espacio, la organización temporal de las actividades y las demandas cognitivas que se plantean al estudiante. Dicho de otro modo: un aula puede tener iluminación natural perfecta y una acústica impecable, pero si la secuenciación didáctica ignora los ciclos atencionales del cerebro infantil o si la evaluación contradice los mecanismos de consolidación de la memoria, el resultado será un entorno parcialmente compatible, no uno verdaderamente alineado con lo que sabemos sobre el funcionamiento cerebral. Esta visión expandida del concepto guía la estructura del presente capítulo, que avanza desde las variables más tangibles del espacio físico hasta las decisiones curriculares y evaluativas que configuran la arquitectura pedagógica del aula.

## **8.2. Iluminación, acústica, temperatura y calidad del aire: variables ambientales con impacto documentado sobre la atención y el procesamiento cognitivo**

De todas las variables ambientales estudiadas, la iluminación es la que acumula evidencia más robusta y diversa. La luz natural no solo facilita la agudeza visual necesaria para la lectura y la escritura, sino que regula el sistema circadiano a través de la vía retinohipotalámica, modulando la secreción de melatonina y los ritmos de alerta cortical. Investigaciones realizadas por Hescong Mahone Group (2003) en escuelas de California mostraron que los estudiantes en aulas con mayor superficie de ventanas y mejor penetración de luz diurna progresaban entre un 20% y un 26% más rápido en pruebas estandarizadas de lectura y matemáticas, en comparación con sus pares en aulas con menor iluminación natural. Barrett et al. (2015) confirmaron que la orientación de las ventanas y la cantidad de luz diurna constituían uno de los factores con mayor peso relativo en su modelo predictivo del progreso académico.

Lo que la neurociencia aporta a esta discusión va más allá de la correlación estadística. Estudios con neuroimagen funcional han documentado que la exposición a condiciones de iluminación deficiente reduce la actividad en la corteza prefrontal dorsolateral, una región

directamente implicada en la memoria de trabajo y el control inhibitorio (Chellappa et al., 2011). Para el niño de educación básica, cuyas funciones ejecutivas están en pleno desarrollo, esta reducción puede traducirse en dificultades para mantener la concentración durante períodos de instrucción directa o para inhibir respuestas impulsivas durante tareas que requieren deliberación. La recomendación práctica derivada de estos hallazgos es clara, aunque su implementación depende de las condiciones arquitectónicas de cada centro escolar: maximizar la entrada de luz natural, evitar el deslumbramiento directo mediante cortinas difusoras o lamas orientables, y complementar con iluminación artificial de temperatura de color entre 4000 y 5000 kelvin durante las horas de menor luminosidad exterior.

La acústica del aula representa un desafío menos visible pero igualmente determinante. El cerebro infantil, particularmente entre los 5 y los 8 años, posee una capacidad de discriminación auditiva en desarrollo que lo hace más vulnerable al ruido de fondo que el cerebro adulto. Shield y Dockrell (2008) demostraron que niveles de ruido ambiental superiores a 35 decibelios interfieren significativamente con la comprensión de instrucciones verbales en niños de primaria, un umbral que se supera con frecuencia en aulas con techos altos, suelos duros y ventanas orientadas hacia vías de tráfico. Cuando la relación señal-ruido es desfavorable cuando la voz del docente compite con el murmullo de los compañeros, el ruido del pasillo o el zumbido del equipo de climatización, el córtex auditivo primario y las áreas de procesamiento lingüístico deben trabajar con mayor esfuerzo para extraer la señal relevante, consumiendo recursos atencionales que quedan indisponibles para la comprensión y la elaboración del contenido. Klatte et al. (2013) documentaron que el ruido crónico en el entorno escolar no solo reduce el rendimiento en tareas de comprensión lectora, sino que también afecta la memoria a corto plazo y las capacidades de procesamiento fonológico, con efectos más pronunciados en niños con trastornos del desarrollo del lenguaje.

Las soluciones acústicas no requieren necesariamente intervenciones arquitectónicas costosas. La incorporación de alfombras o losetas absorbentes, paneles acústicos en paredes y techos, y fieltros en las patas de sillas y mesas pueden reducir el tiempo de reverberación de un aula de manera significativa. Estas medidas, que parecen triviales desde una perspectiva pedagógica, tienen un impacto cuantificable sobre la capacidad del cerebro para procesar el lenguaje oral y, por extensión, sobre la eficacia de cualquier estrategia didáctica que dependa de la comunicación verbal entre docente y estudiantes.

En cuanto a la temperatura, la evidencia converge en señalar una franja óptima de confort térmico para el trabajo cognitivo infantil, situada entre los 20 y los 23 grados centígrados. Temperaturas superiores a 25 grados provocan vasodilatación periférica e

incremento de la frecuencia cardíaca, mecanismos fisiológicos de termorregulación que redirigen recursos metabólicos desde los procesos cognitivos hacia la homeostasis térmica. Wargocki y Wyon (2007) realizaron estudios experimentales en escuelas danesas que revelaron que una reducción de la temperatura del aula de 25 a 20 grados mejoraba el rendimiento de los alumnos en tareas aritméticas y lingüísticas entre un 10% y un 20%. Esta mejora no responde a mecanismos psicológicos difusos; tiene un sustrato metabólico preciso vinculado a la eficiencia energética del tejido neural.

La calidad del aire, medida habitualmente a través de la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ha recibido atención creciente tras la pandemia de COVID-19, que obligó a muchos centros educativos a implementar sistemas de ventilación más eficientes. Concentraciones de CO<sub>2</sub> por encima de 1000 partes por millón un umbral que se alcanza rápidamente en aulas cerradas con 25 o más ocupantes se asocian con disminución del rendimiento en tareas de toma de decisiones y razonamiento complejo (Satish et al., 2012). Shendell et al. (2004) observaron que por cada aumento de 1000 ppm en la concentración de CO<sub>2</sub> en aulas de educación primaria, la tasa de ausentismo se incrementaba significativamente, lo que sugiere una relación entre la calidad del aire interior y la salud general de los estudiantes que, a su vez, condiciona la continuidad del aprendizaje.

### **8.3. Organización espacial del aula: disposición del mobiliario, zonas de trabajo diferenciadas y el concepto de flexibilidad espacial para el aprendizaje activo**

La disposición del mobiliario dentro del aula no es una decisión meramente logística; comunica una filosofía pedagógica y, simultáneamente, condiciona las interacciones sociales y cognitivas que pueden ocurrir en ese espacio. La configuración tradicional en filas paralelas orientadas hacia la pizarra, heredera de modelos instruccionales del siglo XIX, favorece la transmisión unidireccional de información y facilita el control visual del grupo, pero limita severamente las posibilidades de interacción entre pares, de trabajo colaborativo y de movimiento autónomo tres condiciones que la neurociencia vincula con el aprendizaje profundo. Cuando los niños trabajan en pequeños grupos heterogéneos, las áreas cerebrales asociadas con la cognición social corteza prefrontal medial, unión temporoparietal, sistema de neuronas espejo se activan de manera integrada con las redes de procesamiento semántico, generando condiciones propicias para la elaboración y la transferencia del conocimiento (Immordino-Yang, 2016).

**Figura 52**

*Zonificación y flexibilidad del espacio neurocompatible*



Investigaciones recientes sobre el concepto de aulas flexibles, inspirado en modelos escandinavos y australianos, proponen que el espacio escolar debería contener zonas diferenciadas para distintos tipos de actividad cognitiva: una zona de instrucción grupal con visibilidad clara hacia el docente; una zona de trabajo colaborativo con mesas agrupadas y materiales compartidos; una zona de trabajo individual tranquilo para tareas que requieren concentración sostenida; y, cuando el espacio lo permite, una zona de movimiento o descanso regulado. Kariippanon et al. (2018) revisaron la literatura sobre ambientes de aprendizaje innovadores y encontraron que las aulas con disposiciones flexibles se asociaban con mayor compromiso estudiantil y con percepciones más positivas del clima de aprendizaje, aunque advirtieron que la flexibilidad espacial por sí sola no garantiza mejores resultados si no se acompaña de un cambio correspondiente en las prácticas pedagógicas.

Esta advertencia merece detenerse. Un docente que reorganiza las mesas en grupos pero continúa dictando contenidos durante 45 minutos sin interacción habrá modificado la forma sin transformar el fondo. La coherencia entre espacio y práctica es lo que distingue un cambio cosmético de una intervención genuinamente neurocompatible. Cuando el aula ofrece zonas diferenciadas y el docente las utiliza de manera deliberada alternando segmentos de instrucción

directa con fases de trabajo colaborativo, intercalando momentos de reflexión individual con actividades de movimiento, el resultado es un entorno que respeta los ritmos naturales del cerebro y reduce la fatiga cognitiva asociada con la monotonía estimular.

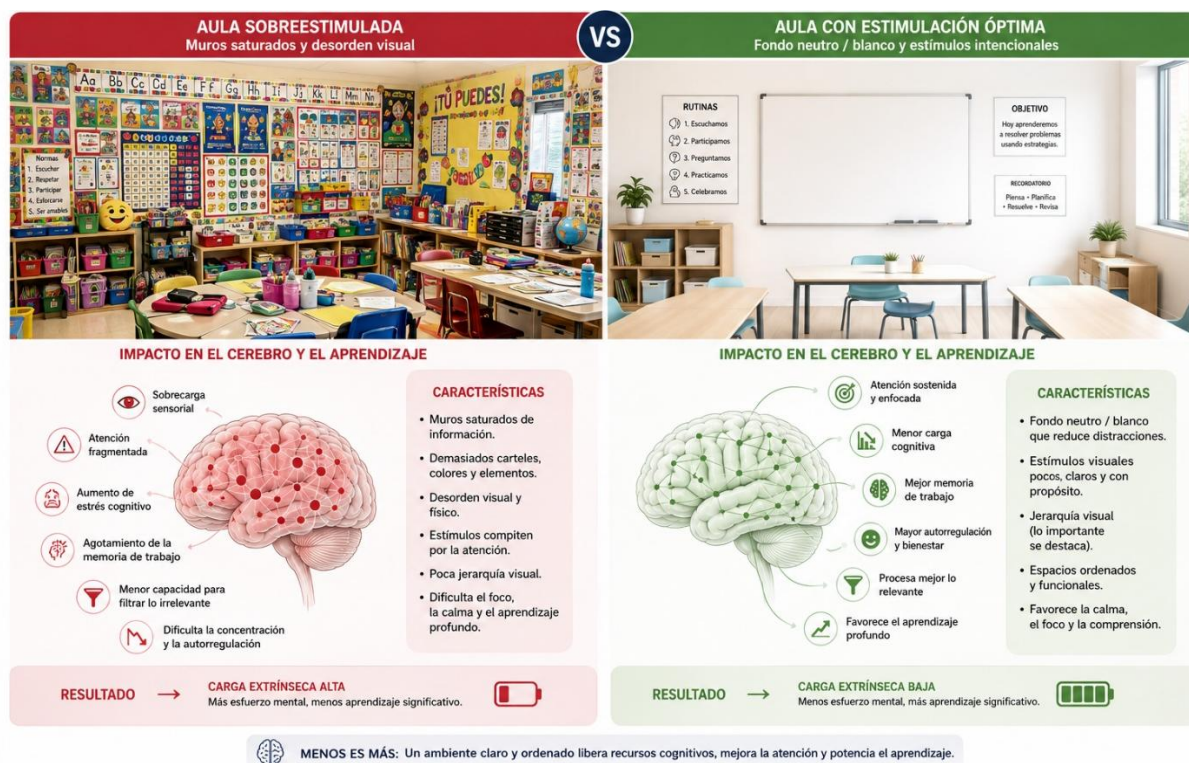
La ergonomía del mobiliario, frecuentemente ignorada en las decisiones de compra institucional, tiene implicaciones directas sobre la postura corporal y, a través de ella, sobre la atención. Sillas demasiado altas o demasiado bajas obligan al niño a adoptar posturas compensatorias que generan tensión muscular, incomodidad y distractibilidad. Knight y Noyes (1999) demostraron que el mobiliario ergonómicamente inadecuado incrementa los movimientos de autoconfort y reduce el tiempo de permanencia en tarea. Modelos recientes de mobiliario escolar que permiten inclinación, oscilación controlada o alternancia entre posiciones sentada y de pie han mostrado efectos positivos sobre la atención sostenida en niños con y sin diagnóstico de trastorno por déficit de atención (Dornhecker et al., 2015).

#### **8.4. El color, los estímulos visuales y el nivel de complejidad perceptiva del aula: entre la estimulación óptima y la sobrecarga sensorial**

El debate sobre el uso del color en el aula se ha movido históricamente entre dos polos: la creencia popular de que los colores vivos estimulan el aprendizaje y la recomendación a veces igualmente dogmática de que las paredes deben ser neutras para evitar distracciones. La neurociencia ofrece un marco más matizado. La percepción del color activa circuitos que conectan la retina con el núcleo geniculado lateral y la corteza visual primaria, pero también con la amígdala y la corteza orbitofrontal, lo que implica que los colores no se procesan como información meramente sensorial, sino que llevan asociados componentes emocionales y atencionales. Mehta y Zhu (2009) mostraron que los colores azulados tienden a favorecer el pensamiento creativo, mientras que los tonos rojizos incrementan el rendimiento en tareas de detalle y precisión, un efecto mediado probablemente por asociaciones culturales con la calma y la alerta, respectivamente.

**Figura 53**

*Carga de estimulación visual y nivel perceptivo*



Sin embargo, trasladar estos hallazgos de laboratorio al diseño del aula requiere cautela. Las paredes de un espacio escolar constituyen un estímulo visual permanente, no un estímulo experimental presentado durante minutos. La exposición prolongada a colores muy saturados puede generar fatiga visual y, paradójicamente, reducir la sensibilidad al contraste cromático que el sistema visual necesita para procesar textos e imágenes con eficacia. Barrett et al. (2015) encontraron que el nivel de estimulación visual del aula seguía una relación curvilínea con el rendimiento: aulas demasiado austeras y aulas excesivamente decoradas se asociaban por igual con menor progreso académico, mientras que los mejores resultados aparecían en aulas con un nivel moderado de complejidad visual.

Este principio conecta directamente con el concepto de carga perceptiva formulado por Lavie (2005): el sistema atencional tiene una capacidad finita de procesamiento, y cuando los estímulos irrelevantes del entorno consumen parte de esa capacidad, se reduce la proporción disponible para el procesamiento de la información relevante. Fisher et al. (2014) realizaron un experimento particularmente revelador en aulas de educación infantil: compararon el rendimiento de niños de preescolar en lecciones de ciencias impartidas en aulas profusamente

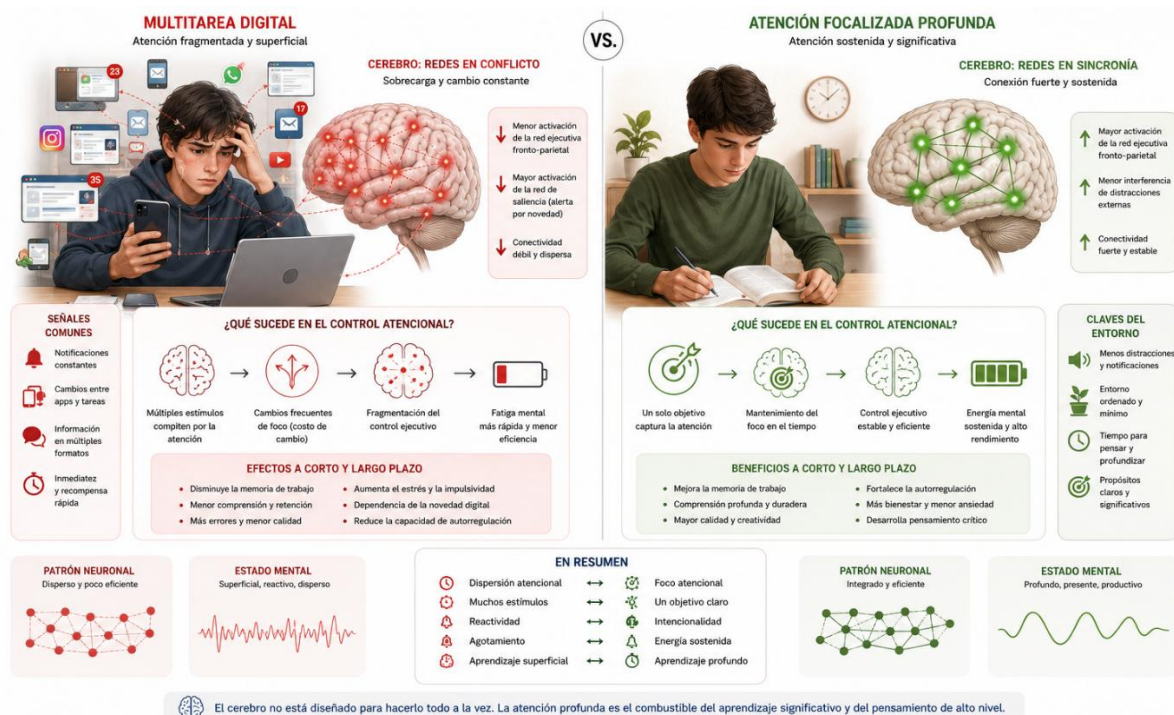
decoradas frente a aulas con decoración mínima. Los niños en aulas sobrecargadas visualmente mostraron más conductas de distracción fuera de tarea y obtuvieron puntuaciones significativamente menores en pruebas de retención del contenido enseñado.

La implicación práctica para el docente no es eliminar toda decoración, sino gestionarla con intencionalidad. Los trabajos de los alumnos expuestos en las paredes cumplen funciones motivacionales y de pertenencia que son valiosas desde la perspectiva del sistema límbico, pero su acumulación sin criterio puede convertir el aula en un entorno visualmente caótico. Una estrategia compatible con la evidencia consiste en rotar periódicamente los materiales expuestos, mantener una pared libre de estímulos como fondo para la pizarra o la pantalla de proyección, y concentrar la decoración en zonas periféricas del campo visual de los estudiantes cuando están orientados hacia el área de instrucción. De este modo, la riqueza visual del aula se preserva sin competir con los procesos atencionales requeridos por la tarea académica.

## 8.5. Tecnología educativa y cerebro: pantallas, tiempo de exposición, multitarea digital y el debate sobre los efectos neurocognitivos del uso de dispositivos en la infancia

**Figura 54**

*Efecto de las pantallas y la multitarea en el desarrollo*



Pocos temas generan tantas tensiones entre padres, docentes, administradores y neurocientíficos como el uso de pantallas digitales en la infancia escolar. La polarización del debate entre quienes ven en la tecnología la herramienta transformadora de la educación y quienes advierten sobre sus efectos deletéreos ha dificultado la construcción de un consenso basado en evidencia matizada. Lo que la investigación permite afirmar con razonable certeza es que el efecto de las pantallas sobre el cerebro infantil no depende tanto del dispositivo en sí como de tres variables moduladoras: el tipo de contenido, la duración de la exposición y el contexto de uso.

Los estudios Mallawaarachchi et al. (2024), en una revisión sistemática con metaanálisis publicada en JAMA Pediatrics, analizaron estudios que evaluaban los contextos de uso de pantallas en niños de 0 a 5 años y sus asociaciones con resultados cognitivos y psicosociales. Los hallazgos revelaron que la exposición a televisión de fondo y el consumo pasivo de programación se asociaban con peores resultados cognitivos, mientras que el co-uso la interacción conjunta entre adulto y niño mediada por un dispositivo mostraba asociaciones positivas con el desarrollo cognitivo. Esta distinción es de enorme trascendencia para el docente de educación básica, porque desplaza el foco desde la pregunta cuánto tiempo hacia la pregunta cómo y con quién.

El cerebro infantil no procesa la información digital de la misma manera que la información presentada en interacciones cara a cara. La transferencia de aprendizaje desde una pantalla bidimensional al mundo tridimensional lo que la literatura ha denominado el déficit de transferencia por video (Anderson y Pempek, 2005) es particularmente pronunciada en niños menores de 3 años, pero persiste en formas atenuadas durante los primeros años de educación básica. Los circuitos prefrontales que permiten abstraer principios generales a partir de ejemplos concretos maduran lentamente, y su eficacia se ve potenciada por la retroalimentación contingente que ofrece la interacción humana y que la mayoría de las aplicaciones digitales no replica con suficiente sofisticación.

El fenómeno de la multitarea digital merece una discusión aparte. Cuando un estudiante alterna entre una aplicación educativa, una ventana de mensajería y un navegador web, no está realmente realizando múltiples tareas simultáneas; está alternando rápidamente la atención entre tareas diferentes, un proceso que la neurociencia denomina cambio de tarea (task switching). Cada alternancia tiene un coste cognitivo medible: la corteza prefrontal debe desactivar la representación mental de la tarea abandonada, activar la de la nueva tarea y suprimir la interferencia proactiva generada por la anterior. Ophir et al. (2009) documentaron que los usuarios habituales de medios múltiples mostraban peor rendimiento en tareas de

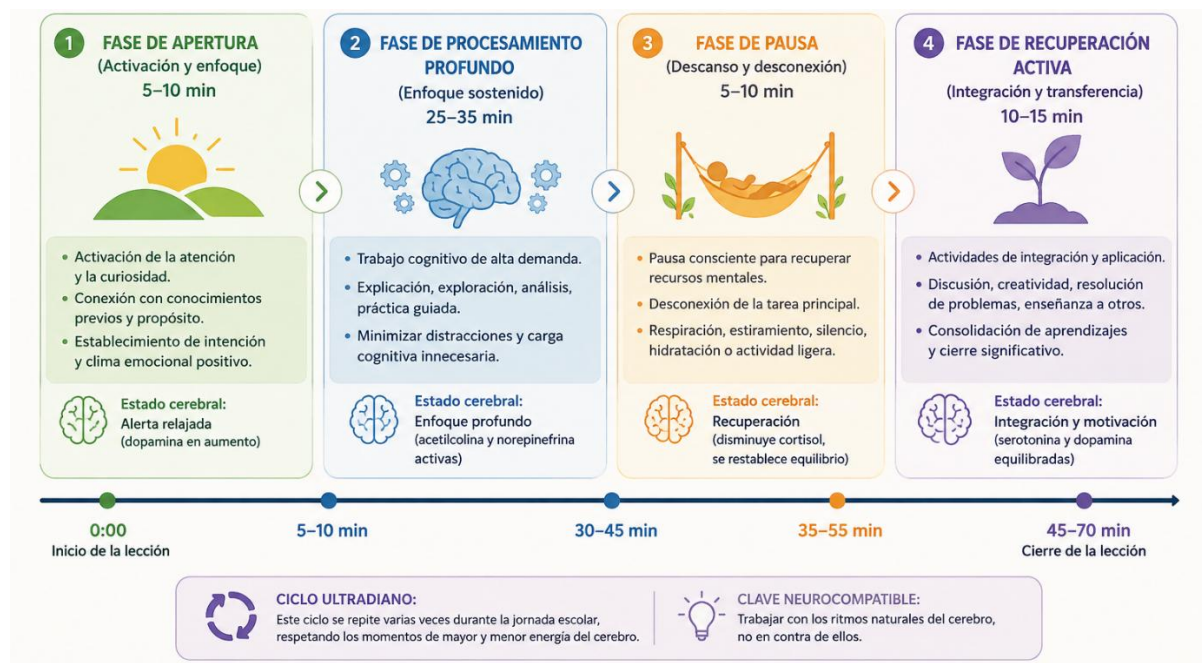
filtrado atencional y mayor susceptibilidad a la distracción por estímulos irrelevantes, un patrón preocupante si se traslada a las edades en que las funciones ejecutivas están consolidándose.

¿Significa esto que la tecnología debe desterrarse del aula de educación básica? Tal conclusión sería tan reduccionista como su opuesta. Lo que la evidencia sugiere es la necesidad de una mediación pedagógica deliberada del uso tecnológico, que incluya: períodos de uso limitados y acordes con la capacidad atencional del grupo de edad, selección de aplicaciones cuyo diseño se base en principios de aprendizaje activo más que en mecanismos de enganche conductual (gamificación superficial, recompensas variables), y momentos explícitos de desconexión digital que permitan la consolidación de lo aprendido. Las guías de la Organización Mundial de la Salud (2019) sobre actividad física, sedentarismo y sueño en menores de 5 años recomiendan limitar el tiempo de pantalla sedentario a no más de una hora diaria, una referencia que, aunque formulada para el contexto del hogar, ofrece un marco orientador para las decisiones escolares sobre la incorporación de dispositivos digitales.

## 8.6. Diseño curricular neurocompatible: secuenciación didáctica basada en ciclos atencionales, espaciado de la práctica, intercalado y recuperación activa

**Figura 55**

*Efecto de las pantallas y la multitarea en el desarrollo*



Si las secciones anteriores han examinado el entorno físico y tecnológico del aula, esta sección aborda el entorno pedagógico propiamente dicho: la manera en que se organiza, secuencia y distribuye el contenido curricular a lo largo del tiempo. La neurociencia del aprendizaje ha producido en las últimas dos décadas un cuerpo sólido de evidencia sobre las condiciones que optimizan la codificación, la consolidación y la recuperación de la información, y tres de los principios más respaldados empíricamente el espaciado de la práctica, el intercalado y la recuperación activa permanecen infrautilizados en la práctica docente habitual.

El espaciado de la práctica se refiere a la distribución temporal de los episodios de estudio o repaso de un mismo contenido, en contraposición a la práctica masiva o concentrada. El efecto del espaciado fue documentado por primera vez por Ebbinghaus en 1885, pero su base neurobiológica se ha esclarecido en las últimas décadas. Cada reexposición a un contenido previamente codificado reactiva la traza de memoria en el hipocampo y genera una nueva oportunidad de consolidación sináptica, un proceso que depende de la síntesis de proteínas y de la modificación de las conexiones entre neuronas del circuito reactivado. Cuando los episodios de práctica están temporalmente espaciados, cada reactivación ocurre en un momento en que la traza ha experimentado cierto grado de olvido parcial, lo que obliga al sistema de memoria a un esfuerzo de recuperación que, paradójicamente, fortalece la retención a largo plazo más que la repetición inmediata. Carpenter et al. (2022), en una revisión publicada en *Nature Reviews Psychology*, sintetizaron décadas de investigación mostrando que el espaciado produce beneficios robustos en dominios tan diversos como el vocabulario, las matemáticas, las ciencias naturales y el aprendizaje motor, y que estos beneficios se mantienen a lo largo de semanas, meses e incluso años.

El intercalado la alternancia de diferentes tipos de problemas o categorías de contenido dentro de una misma sesión de práctica complementa el espaciado al introducir una dificultad deseable adicional. Cuando un estudiante resuelve una secuencia de problemas intercalados (por ejemplo, alternando entre suma, resta y multiplicación en lugar de practicar diez sumas seguidas), el cerebro se ve obligado no solo a ejecutar el procedimiento, sino también a seleccionar cuál procedimiento es pertinente para cada problema, una operación que activa circuitos de categorización y discriminación en la corteza prefrontal y parietal. Sana y Yan (2022) demostraron que el intercalado de la práctica de recuperación en clases de ciencias de educación secundaria producía mejoras significativas en pruebas de transferencia realizadas un mes después del período de instrucción, un hallazgo que confirma que los beneficios del

intercalado no se limitan a la retención literal, sino que se extienden a la capacidad de aplicar el conocimiento en contextos nuevos.

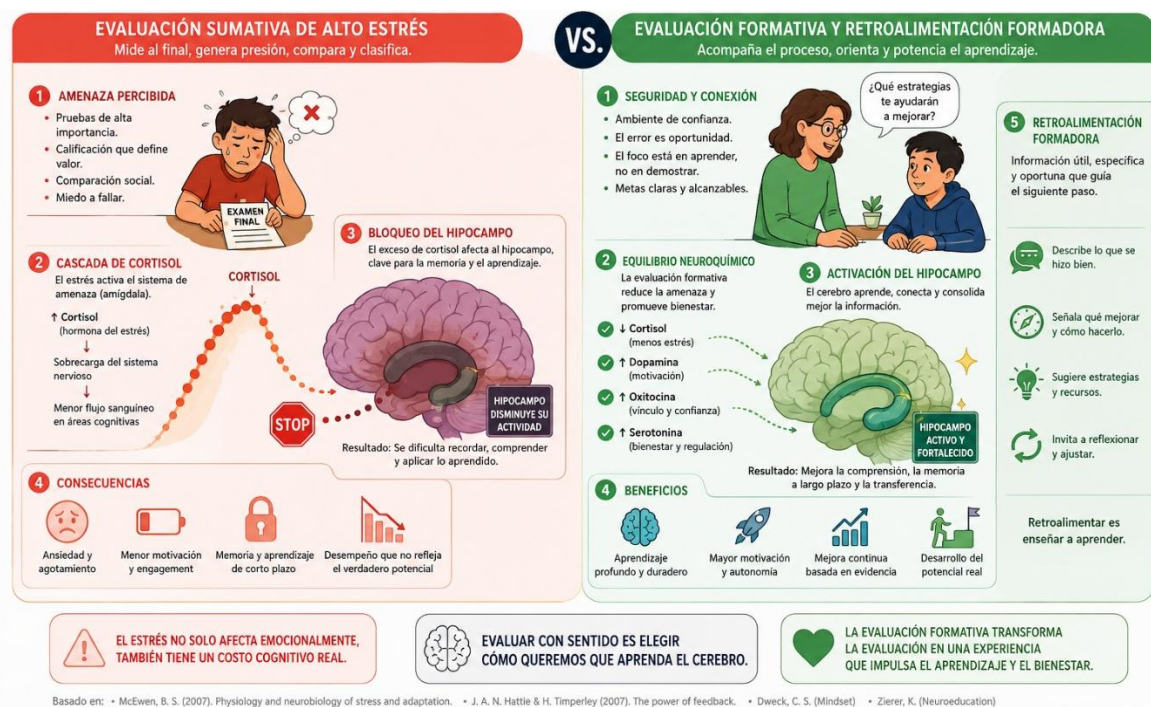
La recuperación activa, o práctica de recuperación, es probablemente la estrategia de aprendizaje con mayor respaldo empírico de toda la psicología cognitiva. Consiste en intentar recuperar información de la memoria sin acceso a materiales de estudio, mediante preguntas, pruebas de bajo riesgo, escritura libre de lo recordado o explicación oral a un compañero. El efecto de la evaluación (testing effect) ha sido replicado en cientos de estudios y su mecanismo neurobiológico parece involucrar un fortalecimiento preferencial de las vías de acceso a la representación almacenada: no basta con que la información esté en la memoria; la fluidez con que puede ser recuperada determina su utilidad funcional. Roediger y Butler (2011) argumentaron que la recuperación activa supera ampliamente a la relectura y al resumen como estrategia de estudio, un hallazgo que tiene implicaciones directas para la práctica docente en educación básica, donde la relectura de apuntes y la repetición mecánica siguen siendo las actividades de repaso predominantes.

La traducción de estos principios al diseño curricular de un aula de educación básica no requiere sofisticación técnica, sino un cambio de mentalidad en la planificación. Implica que el docente no concentre todo el trabajo sobre fracciones en una unidad de tres semanas para luego abandonar el tema hasta el examen final, sino que distribuya práctica de fracciones a lo largo del trimestre, intercalándola con otros contenidos matemáticos y con momentos explícitos de recuperación sin materiales de apoyo. Implica también que las primeras horas de la jornada escolar cuando la función ejecutiva y la capacidad atencional del córtex prefrontal son más eficientes se reserven para contenidos que demandan procesamiento cognitivo profundo, mientras que las actividades más rutinarias o procedimentales se ubiquen en períodos de menor rendimiento atencional. Tokuhamu-Espinosa (2021) ha insistido en que estas decisiones de secuenciación no son accesorias al currículo, sino que constituyen parte del currículo mismo: la distribución temporal del aprendizaje modifica su calidad y su durabilidad, y por tanto merece la misma atención que la selección de contenidos o la elección de materiales didácticos.

## 8.7. La evaluación desde la neuroeducación: formatos de evaluación coherentes con los mecanismos cerebrales de consolidación y transferencia del conocimiento

**Figura 56**

*Evaluación coherente con la memoria y la consolidación*



La evaluación escolar, en su formato convencional, opera sobre un supuesto que la neurociencia ha cuestionado profundamente: la idea de que el examen mide lo que el estudiante sabe. Lo que el examen mide, en rigor, es lo que el estudiante puede recuperar de su memoria bajo condiciones específicas de tiempo, formato y contexto, y esta distinción entre conocimiento almacenado y conocimiento accesible tiene implicaciones sustantivas para el diseño evaluativo. Bjork y Bjork (2011) acuñaron la distinción entre fuerza de almacenamiento (storage strength) y fuerza de recuperación (retrieval strength) para dar cuenta del fenómeno, bien documentado, de que información que no se puede recuperar en un momento dado no ha desaparecido de la memoria, sino que se ha vuelto temporalmente inaccesible por falta de claves de recuperación adecuadas o por interferencia de aprendizajes posteriores.

Desde esta perspectiva, un examen bien diseñado no solo evalúa: enseña. Cada acto de recuperación exitosa durante una prueba fortalece las vías de acceso a la información recuperada, convirtiendo la evaluación en un episodio de aprendizaje por derecho propio. Este doble carácter de la evaluación como instrumento de medición y como herramienta de consolidación exige repensar su frecuencia, su formato y su función dentro de la secuencia

didáctica. La evaluación formativa frecuente y de bajo riesgo, que no penaliza el error sino que lo utiliza como señal para ajustar la enseñanza, se alinea mejor con los mecanismos cerebrales de consolidación que el examen sumativo infrecuente y de alto riesgo, que genera niveles de cortisol capaces de interferir con la recuperación de información bien aprendida (Vogel y Schwabe, 2016).

La retroalimentación que acompaña a la evaluación constituye otro elemento con fundamentación neurocientífica. Cuando un estudiante recibe retroalimentación inmediata sobre un error, la señal de predicción errónea generada por el circuito dopaminérgico mesolímbico impulsa una actualización de la representación almacenada, un mecanismo que la neurociencia computacional ha modelado con precisión creciente (Schultz, 2016). Pero la calidad de la retroalimentación importa tanto como su oportunidad: señalar que una respuesta es incorrecta sin proporcionar información sobre la naturaleza del error o sin guiar al estudiante hacia la respuesta correcta produce una señal de error sin un destino para la corrección. Los formatos evaluativos que incluyen retroalimentación elaborada indicación del tipo de error, pista sobre el procedimiento correcto, invitación a un nuevo intento capitalizan mejor el potencial de aprendizaje que cada acto evaluativo encierra.

Una evaluación verdaderamente neurocompatible incorporaría también la evaluación de la transferencia, es decir, la capacidad del estudiante para aplicar lo aprendido en contextos diferentes a los de la instrucción original. La transferencia depende de la formación de representaciones abstractas y flexibles, más que de memorias episódicas ligadas a un contexto particular, y su evaluación requiere plantear problemas novedosos que preserven la estructura profunda de lo aprendido pero varíen los rasgos superficiales. Esta exigencia convierte la construcción de ítems de evaluación en un acto de diseño cognitivo que va mucho más allá de la mera formulación de preguntas.

## **8.8. Formación docente en neuroeducación: competencias necesarias, riesgos de la divulgación superficial y criterios para distinguir evidencia científica de pseudociencia educativa**

Ninguna de las estrategias descritas en este capítulo ni en los capítulos anteriores de este libro puede implementarse con eficacia si el docente carece de la formación necesaria para comprender los principios neurocientíficos que las fundamentan y, simultáneamente, para evaluar críticamente las afirmaciones que circulan en los medios de divulgación y en los programas de capacitación bajo la etiqueta de "basado en el cerebro". La relación entre

neurociencia y educación ha sido, desde su origen, una relación promisorio pero frágil, amenazada por la simplificación excesiva de hallazgos complejos y por la proliferación de neuromitos: creencias falsas sobre el cerebro que se presentan como hechos científicos y que guían prácticas pedagógicas sin sustento empírico.

El panorama de los neuromitos entre docentes ha sido ampliamente documentado por la investigación. Dekker et al. (2012) encontraron que el 49% de los profesores de educación primaria y secundaria en el Reino Unido y los Países Bajos creía que los estudiantes aprenden mejor cuando reciben instrucción en su "estilo de aprendizaje" preferido (visual, auditivo o kinestésico), una afirmación que carece de respaldo empírico y que desvía recursos pedagógicos hacia clasificaciones sin validez predictiva. Sundaramoorthy et al. (2022), en un estudio con 503 docentes del sur de la India, reportaron que el 84% de los participantes sostenía la creencia en los estilos de aprendizaje, y que en promedio el 65% de los docentes encuestados aceptaba como verdaderas más de dos afirmaciones clasificadas como neuromitos. Novak-Geiger (2023) confirmó que la prevalencia de estas creencias era similar entre estudiantes de psicología y futuros docentes en Alemania, lo que sugiere que el problema no se limita a la formación pedagógica, sino que refleja una vulnerabilidad más general de los profesionales de las ciencias humanas ante la divulgación neurocientífica superficial.

Otros neuromitos particularmente persistentes incluyen la creencia de que "solo usamos el 10% de nuestro cerebro" (una distorsión de datos de neuroimagen que confunde activación regional con capacidad global), la idea de que el cerebro izquierdo y el cerebro derecho tienen funciones completamente separadas (una simplificación de la lateralización funcional que ignora la comunicación constante entre hemisferios a través del cuerpo calloso), y la noción de que los primeros tres años de vida constituyen un período crítico tras el cual el desarrollo cerebral se detiene (una confusión entre períodos sensibles, que existen y son relevantes, y períodos críticos irreversibles, que se restringen a funciones muy específicas como la visión binocular).

¿Qué hace que los neuromitos sean tan resistentes a la corrección? Ruiz-Martín et al. (2022) llevaron a cabo una intervención formativa con docentes en servicio en Cataluña, consistente en un curso de 15 horas sobre neurociencia del aprendizaje. Los resultados mostraron que la formación reducía significativamente la aceptación de neuromitos inmediatamente después del curso, pero que tres meses más tarde algunas creencias mostraban una parcial recuperación, sin regresar a los niveles previos a la formación. Este patrón sugiere que los neuromitos poseen una adhesividad cognitiva vinculada a su simplicidad, a su

consonancia con la experiencia subjetiva de los docentes y a su reforzamiento continuo por medios de comunicación y redes sociales.

La formación docente en neuroeducación debería, por tanto, cumplir tres funciones simultáneas: proporcionar conocimientos actualizados y precisos sobre los mecanismos cerebrales del aprendizaje; desarrollar competencias de alfabetización científica que permitan al docente evaluar la calidad de la evidencia que sustenta una afirmación; y crear espacios de reflexión sobre la propia práctica, donde los conocimientos neurocientíficos se articulen con la experiencia pedagógica del docente, no la sustituyan. Tokuhamma-Espinosa y Nouri (2023), a partir de una encuesta a científicos del campo de Mind, Brain, and Education, identificaron un conjunto de conocimientos que deberían formar parte de la formación mínima de todo docente, incluyendo los principios de plasticidad sináptica, el papel del sueño en la consolidación de la memoria, la relación entre emoción y cognición, y los efectos del estrés crónico sobre las funciones ejecutivas.

Un criterio operativo que todo docente puede aplicar para distinguir evidencia científica de pseudociencia educativa consiste en formular tres preguntas ante cualquier afirmación que se presente como "basada en el cerebro": ¿se ha publicado en revistas con revisión por pares?, ¿se ha replicado en estudios independientes?, ¿la traducción pedagógica que se propone respeta la complejidad del hallazgo original o lo simplifica hasta distorsionarlo? Estas tres preguntas no garantizan infalibilidad, pero constituyen un filtro mínimo de racionalidad epistémica que puede proteger al docente de la inversión de tiempo y recursos en prácticas ineficaces.

Según estudios de Deibl y Zumbach (2023) analizaron las diferencias entre estudiantes de primer año y estudiantes avanzados de formación docente en su capacidad para identificar neuromitos, y encontraron que la exposición curricular a contenidos de neurociencia educativa no producía automáticamente una mejor discriminación entre hechos y mitos. Más que la cantidad de información recibida, lo que parecía marcar la diferencia era el tipo de instrucción: los estudiantes que habían participado en actividades donde debían evaluar críticamente afirmaciones y contrastarlas con la evidencia mostraban mayor precisión en la identificación de neuromitos que aquellos cuya formación se había limitado a la exposición pasiva de contenidos neurocientíficos. Este hallazgo refuerza la paradoja de la divulgación superficial: más información sobre el cerebro, sin herramientas para evaluarla, puede aumentar la confianza del docente en afirmaciones falsas en lugar de reducirla.

## **8.9. Cierre del capítulo y del libro. El compromiso de una educación informada por la ciencia del cerebro: responsabilidad epistémica y horizonte pedagógico**

A lo largo de ocho capítulos, este libro ha intentado trazar un puente entre dos culturas que con demasiada frecuencia se ignoran mutuamente: la de la investigación neurocientífica, con sus protocolos rigurosos pero a menudo desconectados de la realidad escolar, y la de la práctica docente, con su riqueza experiencial pero a veces carente de los marcos teóricos que permitirían sistematizar sus intuiciones más productivas. El puente que la neuroeducación propone no es unidireccional; no se trata de que la neurociencia dicte a los docentes lo que deben hacer, sino de que ambas disciplinas se interpelen, se corrijan y se enriquezcan recíprocamente.

Los capítulos iniciales establecieron las bases neurobiológicas del aprendizaje infantil, desde la arquitectura molecular de la sinapsis hasta los principios de plasticidad dependiente de la experiencia que hacen del cerebro un órgano incesantemente remodelado por lo que aprende. Los capítulos intermedios exploraron los pilares neurocognitivos del rendimiento académico atención, memoria, funciones ejecutivas, regulación emocional y sus implicaciones para el diseño de estrategias didácticas específicas en lectoescritura y pensamiento lógico-matemático. La segunda mitad del libro amplió el foco hacia los moduladores biológicos del aprendizaje movimiento, sueño, nutrición y hacia la diversidad neurológica que caracteriza a cualquier grupo de alumnos. Este capítulo final ha completado el recorrido examinando el espacio donde todo converge: el aula como ecosistema diseñado, desde sus condiciones físicas hasta sus decisiones curriculares y evaluativas.

Una idea ha atravesado transversalmente todos los capítulos: la educación basada en el cerebro no es un método, ni un programa, ni un conjunto de recetas transferibles sin adaptación. Es, ante todo, una disposición epistémica: la voluntad de tomar decisiones pedagógicas informadas por la mejor evidencia disponible sobre cómo aprende el cerebro humano, acompañada de la humildad para reconocer que esa evidencia es siempre provisional, parcial y necesitada de contextualización. El docente que adopta esta disposición no abandona su juicio profesional ni renuncia a su creatividad; al contrario, dispone de un marco más robusto para evaluar las múltiples propuestas didácticas que el mercado educativo le ofrece, para identificar las que tienen sustento empírico y para descartar las que se visten de neurociencia sin poseerla.

La responsabilidad epistémica de la que hablamos tiene también una dimensión ética. Cuando un docente implementa una práctica porque "está basada en la neurociencia" sin haber verificado la calidad de esa base, no solo arriesga la eficacia de su enseñanza, sino que puede

generar daño: clasificar a los niños según estilos de aprendizaje inexistentes limita sus oportunidades; atribuir el bajo rendimiento a diferencias hemisféricas ficticias desvía la atención de factores sociales y pedagógicos modificables; y confiar en programas de "entrenamiento cerebral" sin eficacia demostrada consume un tiempo que podría dedicarse a estrategias con respaldo empírico. La ciencia del cerebro, como toda ciencia, es una herramienta de emancipación cuando se usa con rigor y puede convertirse en un instrumento de opresión intelectual cuando se usa como argumento de autoridad.

El horizonte que este libro propone no es utópico, pero sí exigente. Requiere sistemas de formación docente que integren la neurociencia del aprendizaje no como una asignatura aislada, sino como un hilo conductor que atraviese la didáctica de cada disciplina. Requiere políticas de infraestructura escolar que consideren las variables ambientales discutidas en este capítulo como condiciones previas para el aprendizaje, no como lujos prescindibles. Requiere, sobre todo, una comunidad educativa dispuesta a someter sus prácticas al escrutinio de la evidencia y a modificarlas cuando la evidencia lo justifique, sin que esto se viva como una amenaza a la identidad profesional, sino como una expresión de compromiso con el aprendizaje de cada niño.

La neuroeducación, si es fiel a sus propios principios, debe practicar lo que predica: aprender de sus errores, consolidar lo que funciona, transferir sus hallazgos a contextos nuevos y mantenerse abierta a la revisión permanente. El cerebro que estudiamos es el mismo que utilizamos para estudiarlo, y esa paradoja productiva ser simultáneamente sujeto y objeto del conocimiento confiere a la empresa neuroeducativa una honestidad radical de la que ni la neurociencia pura ni la pedagogía pura pueden disponer por separado.

## Referencias bibliográficas

- Abraham, W. C. y Bear, M. F. (1996). Metaplasticity: The plasticity of synaptic plasticity. *Trends in Neurosciences*, 19(4), 126-130. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(96\)80018-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)80018-X)
- Adolphus, K., Lawton, C. L., & Dye, L. (2016). The effects of breakfast on behavior and academic performance in children and adolescents. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 425. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00425>
- Agarwal, P. K., Nunes, L. D., y Blunt, J. R. (2021). Retrieval practice consistently benefits student learning: A systematic review of applied research in school classrooms. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1409–1453. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09595-9>
- Alloway, T. P., y Alloway, R. G. (2023). *Working memory and learning: A practical guide for teachers* (2.<sup>a</sup> ed.). SAGE Publications.
- Amso, D., y Scerif, G. (2015). The attentive brain: Insights from developmental cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(10), 606–619. <https://doi.org/10.1038/nrn4025>
- Anderson, D. R. y Pempek, T. A. (2005). Television and very young children. *American Behavioral Scientist*, 48(5), 505–522. <https://doi.org/10.1177/0002764204271506>
- Anderson, V., Spencer-Smith, M., y Wood, A. (2011). Do children really recover better? Neurobehavioural plasticity after early brain insult. *Brain*, 134(8), 2197-2221. <https://doi.org/10.1093/brain/awr103>
- Andrews-Hanna, J. R., Saxe, R., y Yarkoni, T. (2021). Contributions of episodic retrieval and mentalizing to autobiographical thought: Evidence from functional neuroimaging, resting-state connectivity, and fMRI meta-analyses. *NeuroImage*, 91, 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.117862>
- Ansari, D. (2012). Culture and education: New frontiers in brain plasticity. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 93-95. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.11.016>
- Araque, A., Parpura, V., Sanzgiri, R. P., y Bhatt, D. K. (1999). Tripartite synapses: Glia, the unacknowledged partner. *Trends in Neurosciences*, 22(5), 208–215. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(98\)01349-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(98)01349-6)
- Armstrong, T. (2012). *Neurodiversity in the classroom: Strength-based strategies to help students with special needs succeed in school and life*. ASCD.

- Arnsten, A. F. T. (2009). Stress signalling pathways that impair prefrontal cortex structure and function. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 410–422. <https://doi.org/10.1038/nrn2648>
- Arnsten, A. F. T. (2015). Stress weakens prefrontal networks: Molecular insults to higher cognition. *Nature Neuroscience*, 18(10), 1376–1385. <https://doi.org/10.1038/nn.4087>
- Arnsten, A. F. T. (2022). Catecholamine modulation of prefrontal cortical function in nonhuman primates and humans: Relevance to neuropsychiatric disorders. En M. D'Esposito y J. H. Bhatt (Eds.), *The frontal lobes* (pp. 119–138). Cambridge University Press.
- Astle, D. E., Holmes, J., Kievit, R., y Gathercole, S. E. (2022). Annual Research Review: The transdiagnostic revolution in neurodevelopmental disorders. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 63(4), 397–417. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13481>
- Aston-Jones, G., y Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 403–450. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135709>
- Atance, C. M., y O'Neill, D. K. (2001). Episodic future thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 533–539. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01804-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01804-0)
- Álvarez-Bueno, C., Hillman, C. H., Cavero-Redondo, I., Sánchez-López, M., Pozuelo-Carrascosa, D. P., y Martínez-Vizcaíno, V. (2022). Aerobic fitness and academic achievement in primary school-aged children: A systematic review and meta-analysis of longitudinal studies. *Journal of Sports Sciences*, 40(14), 1576–1587. <https://doi.org/10.1080/02640414.2022.2089356>
- Azevedo, F. A. C., Carvalho, L. R. B., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E. L., Leite, R. E. P., Filho, W. J., Lent, R., y Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, 513(5), 532–541. <https://doi.org/10.1002/cne.21974>
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417–423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
- Bakin, J. S., y Weinberger, N. M. (1996). Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(20), 11219–11224. <https://doi.org/10.1073/pnas.93.20.11219>

- Barquero, L. A., Davis, N., y Cutting, L. E. (2014). Neuroimaging of reading intervention: A systematic review and activation likelihood estimate meta-analysis. *PLoS ONE*, 9(1), e83668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083668>
- Barrett, L. F. (2017). *How emotions are made: The secret life of the brain*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y. y Barrett, L. (2015). The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis. *Building and Environment*, 89, 118–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.013>
- Barrett, P., Davies, F., Zhang, Y. y Barrett, L. (2017). The holistic impact of classroom spaces on learning in specific subjects. *Environment and Behavior*, 49(4), 425–451. <https://doi.org/10.1177/0013916516648735>
- Barrett, P., Treves, A., Shmis, T., Ambasz, D. y Ustinova, M. (2019). The impact of school infrastructure on learning: A synthesis of the evidence. World Bank Group. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1378-8>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, 59, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Baumgartner, S. E., van der Schuur, W. A., Lemmens, J. S., y te Poel, F. (2023). Media multitasking and attention problems in children and adolescents: A longitudinal study. *Computers in Human Behavior*, 138, 107469. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107469>
- Bechara, A., Damasio, A. R., Damasio, H., y Anderson, S. W. (1994). Insensitivity to future consequences following damage to human prefrontal cortex. *Cognition*, 50(1–3), 7–15. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90018-3)
- Bechara, A., y Damasio, A. R. (2005). The somatic marker hypothesis: A neural theory of economic decision. *Games and Economic Behavior*, 52(2), 336–372. <https://doi.org/10.1016/j.geb.2004.06.010>
- Bedny, M. (2017). Evidence from blindness for a cognitively pluripotent cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(9), 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.06.003>
- Belsky, J., y Pluess, M. (2009). Beyond diathesis stress: Differential susceptibility to environmental influences. *Psychological Bulletin*, 135(6), 885–908. <https://doi.org/10.1037/a0017376>
- Benton, D., y Young, H. A. (2015). Do small differences in hydration status affect mood and mental performance? *Nutrition Reviews*, 73(S2), 83–96. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuv045>

- Berger, A. T., Wahlstrom, K. L., y Widome, R. (2022). Relationships between sleep duration and adolescent brain structure in the ABCD study. *Sleep*, 45(Supplement\_1), A215. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsac079.488>
- Berger, C., Milicic, N., Alcalay, L., Torretti, A., Arab, M. P., y Justiniano, B. (2014). Socio-emotional well-being and academic achievement: Evidence from a multilevel approach. *Psicothema*, 26(4), 474–480. <https://doi.org/10.7334/psicothema2014.19>
- Berridge, K. C., y Robinson, T. E. (2016). Liking, wanting, and the incentive-sensitization theory of addiction. *American Psychologist*, 71(8), 670–679. <https://doi.org/10.1037/amp0000059>
- Best, J. R., y Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641–1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bhagya, V. R., Srikumar, B. N., y Shankaranarayana Rao, B. S. (2022). Environmental enrichment reopens critical period plasticity: Mechanisms and implications. *Neural Plasticity*, 2022, Article 4812431. <https://doi.org/10.1155/2022/4812431>
- Bhatt, D. H., Zhang, S., y Bhatt, D. R. (2009). Dendritic spine dynamics. *Annual Review of Physiology*, 71, 261–282. <https://doi.org/10.1146/annurev.physiol.010908.163140>
- Bhatt, D. R., Bhatt, D. H., y Bhatt, S. (2022). Metaplasticity in prefrontal cortex following chronic stress exposure: Implications for developmental psychopathology. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 54, Article 101085. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101085>
- Bialystok, E. (2021). Bilingualism: Pathway to cognitive reserve. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(5), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.02.003>
- Binder, J. R., y Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(11), 527–536. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.10.001>
- Bjork, R. A. y Bjork, E. L. (2011). Making things hard on yourself, but in a good way: Creating desirable difficulties to enhance learning. En M. A. Gernsbacher, R. W. Pew, L. M. Hough y J. R. Pomerantz (Eds.), *Psychology and the real world: Essays illustrating fundamental contributions to society* (pp. 56–64). Worth Publishers.
- Bjorklund, D. F. (2021). *How children invented humanity: The role of development in human evolution*. Oxford University Press.
- Black, P., y Wiliam, D. (1998). Assessment and classroom learning. *Assessment in Education: Principles, Policy & Practice*, 5(1), 7–74. <https://doi.org/10.1080/0969595980050102>
- Blair, C. (2016). Executive function and early childhood education. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.05.009>

- Blair, C., y Raver, C. C. (2015). School readiness and self-regulation: A developmental psychobiological approach. *Annual Review of Psychology*, 66, 711–731. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015221>
- Blair, C., y Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, 78(2), 647–663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Blakemore, S.-J. (2018). *Inventing ourselves: The secret life of the teenage brain*. PublicAffairs.
- Blanchette, I., y Richards, A. (2010). The influence of affect on higher level cognition: A review of research on interpretation, judgement, decision making and reasoning. *Cognition and Emotion*, 24(4), 561–595. <https://doi.org/10.1080/02699930903132496>
- Bliss, T. V. P. y Lømo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *Journal of Physiology*, 232(2), 331–356. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1973.sp010273>
- Bodrova, E., y Leong, D. J. (2015). Vygotskian and post-Vygotskian views on children's play. *American Journal of Play*, 7(3), 371–388.
- Bourgeois, J.-P., Goldman-Rakic, P. S., y Rakic, P. (1994). Synaptogenesis in the prefrontal cortex of rhesus monkeys. *Cerebral Cortex*, 4(1), 78–96. <https://doi.org/10.1093/cercor/4.1.78>
- Brackett, M. A. (2019). *Permission to feel: Unlocking the power of emotions to help our kids, ourselves, and our society thrive*. Celadon Books.
- Brackett, M. A., Bailey, C. S., Hoffmann, J. D., y Simmons, D. N. (2019). RULER: A theory-driven, systemic approach to social, emotional, and academic learning. *Educational Psychologist*, 54(3), 144–161. <https://doi.org/10.1080/00461520.2019.1614447>
- Brocki, K. C., y Bohlin, G. (2004). Executive functions in children aged 6 to 13: A dimensional and developmental study. *Developmental Neuropsychology*, 26(2), 571–593. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2602\\_3](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2602_3)
- Bruer, J. T. (1997). Education and the brain: A bridge too far. *Educational Researcher*, 26(8), 4–16. <https://doi.org/10.3102/0013189X026008004>
- Bruer, J. T. (1999). *The myth of the first three years: A new understanding of early brain development and lifelong learning*. Free Press.

- Bunge, S. A., y Zelazo, P. D. (2006). A brain-based account of the development of rule use in childhood. *Current Directions in Psychological Science*, 15(3), 118–121. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00419.x>
- Butterworth, B., Varma, S., y Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From brain to education. *Science*, 332(6033), 1049–1053. <https://doi.org/10.1126/science.1201536>
- Caballero, A., y Bhatt, J. (2021). GABAergic mechanisms in the development of inhibitory control. En R. Bhatt (Ed.), *Developmental neuroscience* (pp. 211–230). Springer.
- Calkins, S. D., y Perry, N. B. (2016). The development of emotion regulation: Implications for child adjustment. En D. Cicchetti (Ed.), *Developmental psychopathology* (Vol. 4, pp. 187–242). Wiley.
- Canada, K. L., Ngo, C. T., Newcombe, N. S., Geng, F., y Riggins, T. (2023). It's all in the details: Relations between young children's developing pattern separation abilities and hippocampal subfield volumes. *Cerebral Cortex*, 33(8), 3975–3987. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac323>
- Carpenter, S. K., Cepeda, N. J., Rohrer, D., Kang, S. H. K., y Pashler, H. (2012). Using spacing to enhance diverse forms of learning: Review of recent research and implications for instruction. *Educational Psychology Review*, 24(3), 369–378. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9205-z>
- Carpenter, S. K., Pan, S. C., y Butler, A. C. (2022). The science of effective learning with spacing and retrieval practice. *Nature Reviews Psychology*, 1(9), 496–511. <https://doi.org/10.1038/s44159-022-00089-1>
- CASEL. (2020). CASEL's SEL framework: What are the core competence areas and where are they promoted? Collaborative for Academic, Social, and Emotional Learning. <https://casel.org/sel-framework/>
- Casey, B. J., Cannonier, T., Conley, M. I., Cohen, A. O., Barch, D. M., Heitzeg, M. M., Soules, M. E., Teslovich, T., Dellarco, D. V., Garavan, H., Orr, C. A., Wager, T. D., Banich, M. T., Speer, N. K., Sutherland, M. T., Riedel, M. C., Dick, A. S., Bjork, J. M., Thomas, K. M., ... Dale, A. M. (2018). The Adolescent Brain Cognitive Development (ABCD) study: Imaging acquisition across 21 sites. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 32, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.03.001>
- Casey, B. J., Jones, R. M., y Hare, T. A. (2008). The adolescent brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1124(1), 111–126. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.010>
- Caspi, A., Sugden, K., Moffitt, T. E., Taylor, A., Craig, I. W., Harrington, H., McClay, J., Mill, J., Martin, J., Braithwaite, A., y Poulton, R. (2003). Influence of life stress on

- depression: Moderation by a polymorphism in the 5-HTT gene. *Science*, 301(5631), 386–389. <https://doi.org/10.1126/science.1083968>
- CAST. (2018). Universal Design for Learning Guidelines version 2.2. <http://udlguidelines.cast.org>
- Castellanos, F. X., y Aoki, Y. (2016). Intrinsic functional connectivity in attention-deficit/hyperactivity disorder: A science in development. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 1(3), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2016.03.004>
- Castles, A., Rastle, K., y Nation, K. (2018). Ending the reading wars: Reading acquisition from novice to expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19(1), 5–51. <https://doi.org/10.1177/1529100618772271>
- Centanni, T. M., Norton, E. S., Ozernov-Palchik, O., Park, A., Beach, S. D., Halverson, K., Gaab, N., y Gabrieli, J. D. E. (2022). Disrupted left fusiform response to print in beginning kindergartners is associated with subsequent reading. *NeuroImage: Clinical*, 33, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2021.102941>
- Cepeda, N. J., Pashler, H., Vul, E., Wixted, J. T., y Rohrer, D. (2006). Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis. *Psychological Bulletin*, 132(3), 354–380. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.132.3.354>
- Chaddock, L., Erickson, K. I., Prakash, R. S., Kim, J. S., Voss, M. W., VanPatter, M., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Konkel, A., Hillman, C. H., Cohen, N. J., y Kramer, A. F. (2010). A neuroimaging investigation of the association between aerobic fitness, hippocampal volume, and memory performance in preadolescent children. *Brain Research*, 1358, 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.08.049>
- Chaddock-Heyman, L., Erickson, K. I., Voss, M. W., Knecht, A. M., Pontifex, M. B., Castelli, D. M., Hillman, C. H., y Kramer, A. F. (2014). The effects of physical activity on functional MRI activation associated with cognitive control in children. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 72. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00072>
- Chang, J. P.-C., Su, K.-P., Mondelli, V., y Pariante, C. M. (2018). Omega-3 polyunsaturated fatty acids in youths with attention deficit hyperactivity disorder: A systematic review and meta-analysis of clinical trials and biological studies. *Neuropsychopharmacology*, 43(3), 534–545. <https://doi.org/10.1038/npp.2017.160>
- Chang, L. J., Yarkoni, T., Khaw, M. W., y Sanfey, A. G. (2013). Decoding the role of the insula in human cognition: Functional parcellation and large-scale reverse inference. *Cerebral Cortex*, 23(3), 739–749. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs065>

- Chapman, R. (2023). The neurodiversity paradigm and its discontents. En R. Chapman y W. Carel (Eds.), *Neurodiversity studies: A new critical paradigm* (pp. 23–42). Routledge.
- Chellappa, S. L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T. y Cajochen, C. (2011). Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: Can blue-enriched light keep us alert? *PLoS ONE*, 6(1), e16429. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016429>
- Cho, S., Ryali, S., Geary, D. C., y Menon, V. (2012). How does a child solve  $7 + 8$ ? Decoding brain activity patterns associated with counting and retrieval strategies. *Developmental Science*, 15(6), 989–1001. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01187.x>
- Coffield, F., Moseley, D., Hall, E., y Ecclestone, K. (2004). Learning styles and pedagogy in post-16 learning: A systematic and critical review. Learning and Skills Research Centre.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., y Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the visual word form area. *Brain*, 125(5), 1054–1069. <https://doi.org/10.1093/brain/awf094>
- Collingridge, G. L., Peineau, S., Howland, J. G., y Wang, Y. T. (2010). Long-term depression in the CNS. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(7), 459–473. <https://doi.org/10.1038/nrn2867>
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., y Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204–256. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.1.204>
- Commodari, E., y Di Blasi, M. (2022). Exogenous and endogenous attention in children: A meta-analysis of developmental trends. *Developmental Psychology*, 58(5), 893–911. <https://doi.org/10.1037/dev0001327>
- Contreras-Jordán, O., González-Martí, I., Gil-Madrona, P., y Hall-López, J. A. (2022). Effects of active breaks on selective attention in primary school children from Colombia: A quasi-experimental study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2291. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042291>
- Cools, R., Roberts, A. C., y Robbins, T. W. (2008). Serotonergic regulation of emotional and behavioural control processes. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(1), 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.10.011>
- Corbetta, M., y Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(3), 201–215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>

- Cortese, S., Aoki, Y. Y., Itahashi, T., Castellanos, F. X., y Eickhoff, S. B. (2021). Systematic review and meta-analysis: Resting-state functional magnetic resonance imaging studies of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 60(1), 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2020.08.014>
- Cotman, C. W., Berchtold, N. C., y Christie, L.-A. (2007). Exercise builds brain health: Key roles of growth factor cascades and inflammation. *Trends in Neurosciences*, 30(9), 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.06.011>
- Cowan, N. (2022). Working memory development: A 50-year assessment of research and underlying theories. *Cognition*, 224, 105075. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2022.105075>
- Craig, A. D. (2009). How do you feel—now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(1), 59–70. <https://doi.org/10.1038/nrn2555>
- Craik, F. I. M., y Lockhart, R. S. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 11(6), 671–684. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(72\)80001-X](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(72)80001-X)
- Crompton, C. J., Ropar, D., Evans-Williams, C. V., Flynn, E. G., y Fletcher-Watson, S. (2020). Autistic peer-to-peer information transfer is highly effective. *Autism*, 24(7), 1704–1712. <https://doi.org/10.1177/1362361320919286>
- Crowley, S. J., Wolfson, A. R., Tarokh, L., y Carskadon, M. A. (2018). An update on adolescent sleep: New evidence informing the perfect storm model. *Journal of Adolescence*, 67, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.adolescence.2018.06.001>
- Cummins, J. (2021). Rethinking the education of multilingual learners: A critical analysis of theoretical concepts. *Multilingual Matters*.
- Dadvand, P., Nieuwenhuijsen, M. J., Esnaola, M., Forns, J., Basagaña, X., Alvarez-Pedrerol, M., Rivas, I., López-Vicente, M., De Castro Pascual, M., Su, J., Jerrett, M., Querol, X., y Sunyer, J. (2015). Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(26), 7937–7942. <https://doi.org/10.1073/pnas.1503402112>
- Dai, D. Y., y Sternberg, R. J. (2021). *Scientific inquiry into human potential: Historical and contemporary perspectives across disciplines*. Routledge.
- Dajani, D. R., y Uddin, L. Q. (2015). Demystifying cognitive flexibility: Implications for clinical and developmental neuroscience. *Trends in Neurosciences*, 38(9), 571–578. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.07.003>

- Daly-Smith, A., Quarmby, T., Archbold, V. S. J., Corrigan, N., Wilson, D., Resaland, G. K., Bartholomew, J. B., Singh, A., Tjomsland, H. E., Sherar, L. B., Chalkley, A., Routen, A. C., Shickle, D., Bingham, D. D., Barber, S. E., van Sluijs, E., Fairclough, S. J., y McKenna, J. (2020). Using a multi-stakeholder experience-based design process to co-develop the Creating Active Schools Framework. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 17, 13. <https://doi.org/10.1186/s12966-020-0917-z>
- Damasio, A. R. (1994). *Descartes' error: Emotion, reason, and the human brain*. Putnam.
- Damasio, A. R. (2010). *Self comes to mind: Constructing the conscious brain*. Pantheon Books.
- Davidson, R. J., y McEwen, B. S. (2012). Social influences on neuroplasticity: Stress and interventions to promote well-being. *Nature Neuroscience*, 15(5), 689–695. <https://doi.org/10.1038/nn.3093>
- Davis, M., y Whalen, P. J. (2001). The amygdala: Vigilance and emotion. *Molecular Psychiatry*, 6(1), 13–34. <https://doi.org/10.1038/sj.mp.4000812>
- Deci, E. L., y Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Plenum Press.
- Dehaene, S. (2009). *Reading in the brain: The new science of how we read*. Viking.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics* (ed. revisada). Oxford University Press.
- Dehaene, S. (2020). *How we learn: Why brains learn better than any machine... for now*. Viking.
- Dehaene, S., y Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.003>
- Dehaene, S., Bossini, S., y Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., y Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234–244. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., y Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3–6), 487–506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., y Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading

- acquisition. PLoS Biology, 16(3), e2004103.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- Deibl, I. y Zumbach, J. (2023). Pre-service teachers' beliefs about neuroscience and education—Do freshmen and advanced students differ in their ability to identify myths? Teaching and Teacher Education, 121, 103934.  
<https://doi.org/10.1177/14757257221146649>
- Dekker, S., Lee, N. C., Howard-Jones, P., y Jolles, J. (2012). Neuromyths in education: Prevalence and predictors of misconceptions among teachers. Frontiers in Psychology, 3, 429. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00429>
- DeLuca, V., Rothman, J., Bialystok, E., y Pliatsikas, C. (2020). Duration and extent of bilingual experience modulate neurocognitive outcomes. NeuroImage, 204, 116222.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116222>
- Dettmers, S., Bakadorova, O., y Rossa, F. (2022). Classroom breaks and student attention: Evidence from primary school settings. Learning and Instruction, 82, 101678.  
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2022.101678>
- Dewald, J. F., Meijer, A. M., Oort, F. J., Kerkhof, G. A., y Bögels, S. M. (2010). The influence of sleep quality, sleep duration and sleepiness on school performance in children and adolescents: A meta-analytic review. Sleep Medicine Reviews, 14(3), 179–189.  
<https://doi.org/10.1016/j.smr.2009.10.004>
- Dewar, M., Alber, J., Butler, C., Cowan, N., y Della Sala, S. (2012). Brief wakeful resting boosts new memories over the long term. Psychological Science, 23(9), 955–960.  
<https://doi.org/10.1177/0956797612441220>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. Annual Review of Psychology, 64, 135–168.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A., y Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. Developmental Cognitive Neuroscience, 18, 34–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005>
- Diamond, A., y Ling, D. S. (2020). Review of the evidence on, and fundamental questions about, efforts to improve executive functions, including working memory. En J. M. Novick, M. F. Bunting, M. R. Dougherty y R. W. Engle (Eds.), Cognitive and working memory training: Perspectives from psychology, neuroscience, and human development (pp. 143-431). Oxford University Press.

- Diekelmann, S., y Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 114–126. <https://doi.org/10.1038/nrn2762>
- Dignath, C., y Büttner, G. (2008). Components of fostering self-regulated learning among students: A meta-analysis on intervention studies at primary and secondary school level. *Metacognition and Learning*, 3(3), 231–264. <https://doi.org/10.1007/s11409-008-9029-x>
- Dillon, M. R., Kannan, H., Dean, J. T., Spelke, E. S., y Duflo, E. (2017). Cognitive science in the field: A preschool intervention durably enhances intuitive but not formal mathematics. *Science*, 357(6346), 47–55. <https://doi.org/10.1126/science.aal4724>
- Dornhecker, M., Blake, J. J., Benden, M., Zhao, H. y Wendel, M. (2015). The effect of stand-biased desks on academic engagement: An exploratory study. *International Journal of Health Promotion and Education*, 53(5), 271–280. <https://doi.org/10.1080/14635240.2015.1029641>
- Duke, N. K., Ward, A. E., y Pearson, P. D. (2021). The science of reading comprehension instruction. *The Reading Teacher*, 74(6), 663–672. <https://doi.org/10.1002/trtr.1993>
- Dumontheil, I. (2014). Development of abstract thinking during childhood and adolescence: The role of rostrolateral prefrontal cortex. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 10, 57–76. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.07.009>
- Dumontheil, I., Wolf, L. K., y Blakemore, S.-J. (2022). Development of social and emotional decision-making during childhood and adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 56, 101118. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101118>
- 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>
- Dunsmoor, J. E., Murty, V. P., Clewett, D., Phelps, E. A., y Davachi, L. (2022). Tag and capture: How salient experiences target and rescue nearby memories. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(9), 782–795. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.009>
- Durlak, J. A., Weissberg, R. P., Dymnicki, A. B., Taylor, R. D., y Schellinger, K. B. (2011). The impact of enhancing students' social and emotional learning: A meta-analysis of school-based universal interventions. *Child Development*, 82(1), 405–432. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01564.x>
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis: Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Duncker & Humblot.

- Edmonds, C. J., y Burford, D. (2009). Should children drink more water? The effects of drinking water on cognition in children. *Appetite*, 52(3), 776–779. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2009.02.010>
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Yaghoub-Zadeh, Z., y Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36(3), 250–287. <https://doi.org/10.1598/RRQ.36.3.2>
- Eisenberg, N., Spinrad, T. L., y Eggum, N. D. (2010). Emotion-related self-regulation and its relation to children's maladjustment. *Annual Review of Clinical Psychology*, 6, 495–525. <https://doi.org/10.1146/annurev.clinpsy.121208.131208>
- Elder, T. E. (2010). The importance of relative standards in ADHD diagnoses: Evidence based on exact birth dates. *Journal of Health Economics*, 29(5), 641–656. <https://doi.org/10.1016/j.jhealeco.2010.06.003>
- Fair, D. A., Cohen, A. L., Power, J. D., Dosenbach, N. U. F., Church, J. A., Miezin, F. M., Schlaggar, B. L., y Petersen, S. E. (2009). Functional brain networks develop from a "local to distributed" organization. *PLoS Computational Biology*, 5(5), e1000381. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000381>
- Falquez, J. F., y Ocampo, D. (2022). Prevalencia de neuromitos en docentes ecuatorianos: un estudio transversal en formación de posgrado. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 54, 42–51. <https://doi.org/10.14349/rlp.2022.v54.5>
- Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., y Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(3), 340–347. <https://doi.org/10.1162/089892902317361886>
- Fandakova, Y., y Hartley, C. A. (2020). Mechanisms of learning and plasticity in childhood and adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 42, 100764. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100764>
- Faraone, S. V., Banaschewski, T., Coghill, D., Zheng, Y., Biederman, J., Bellgrove, M. A., ... y Wang, Y. (2021). The world federation of ADHD international consensus statement: 208 evidence-based conclusions about the disorder. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 128, 789–818. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.01.022>
- Feigenson, L., Dehaene, S., y Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>

- Fields, R. D. (2015). A new mechanism of nervous system plasticity: Activity-dependent myelination. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(12), 756–767. <https://doi.org/10.1038/nrn4023>
- Fiorella, L., y Mayer, R. E. (2021). *Generative learning in action: Strategies for the classroom*. Routledge.
- Fischer, K. W., y Bidell, T. R. (2006). Dynamic development of action, thought, and emotion. En W. Damon y R. M. Lerner (Eds.), *Handbook of child psychology: Vol. 1. Theoretical models of human development* (6.<sup>a</sup> ed., pp. 313–399). Wiley.
- Fisher, A. V., Godwin, K. E., y Seltman, H. (2014). Visual environment, attention allocation, and learning in young children: When too much of a good thing may be bad. *Psychological Science*, 25(7), 1362–1370. <https://doi.org/10.1177/0956797614533801>
- Foley-Nicpon, M., Assouline, S. G., y Fosenburg, S. (2021). The relationship between self-concept and psychosocial functioning in twice-exceptional learners. *Gifted Child Quarterly*, 65(4), 317–338. <https://doi.org/10.1177/00169862211018202>
- Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., y Esterman, M. (2017). Recent theoretical, neural, and clinical advances in sustained attention research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1396(1), 70–91. <https://doi.org/10.1111/nyas.13318>
- Frankland, P. W., y Bontempi, B. (2005). The organization of recent and remote memories. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(2), 119–130. <https://doi.org/10.1038/nrn1607>
- Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: The broaden-and-build theory of positive emotions. *American Psychologist*, 56(3), 218–226. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.3.218>
- Frey, U., y Morris, R. G. M. (1997). Synaptic tagging and long-term potentiation. *Nature*, 385(6616), 533–536. <https://doi.org/10.1038/385533a0>
- Friederici, A. D. (2017). *Language in our brain: The origins of a uniquely human capacity*. MIT Press.
- Friedman, N. P., y Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Frisvold, D. E. (2015). Nutrition and cognitive achievement: An evaluation of the School Breakfast Program. *Journal of Public Economics*, 124, 91–104. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2014.12.003>
- Frodl, T., Szyf, M., Carballedo, A., Ly, V., Dymov, S., Vaisheva, F., Morris, D., y Meaney, M. J. (2022). Serotonin transporter gene methylation and teacher support interactions in

- school-age children: Effects on emotional regulation. *Translational Psychiatry*, 12, 188. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-01950-4>
- Fuchs, L. S., Fuchs, D., Seethaler, P. M., Cutting, L. E., y Mancilla-Martinez, J. (2021). Connections between reading comprehension and word-problem solving via oral language comprehension: Implications for comorbid learning disabilities. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 2021(178), 73–90. <https://doi.org/10.1002/cad.20413>
- Fuhrmann, D., Knoll, L. J., y Blakemore, S.-J. (2015). Adolescence as a sensitive period of brain development. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(10), 558-566. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.07.008>
- Fuster, J. M. (2015). *The prefrontal cortex* (5.<sup>a</sup> ed.). Academic Press.
- Galaburda, A. M., LoTurco, J., Ramus, F., Fitch, R. H., y Rosen, G. D. (2006). From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, 9(10), 1213–1217. <https://doi.org/10.1038/nn1772>
- Galván, A. (2021). *The neuroscience of adolescence* (2.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press.
- Gao, W., Alcauter, S., Smith, J. K., Gilmore, J. H., y Lin, W. (2022). Development of human brain cortical network architecture during infancy. *Brain Structure and Function*, 227(4), 1189–1205. <https://doi.org/10.1007/s00429-022-02460-3>
- García, O., y Wei, L. (2014). *Translanguaging: Language, bilingualism and education*. Palgrave Macmillan.
- García-Madruga, J. A., Gómez-Veiga, I., y Vila, J. Ó. (2021). Understanding and reasoning with texts: New approaches and challenges in reading comprehension. *Psicología Educativa*, 27(1), 69–78. <https://doi.org/10.5093/psed2021a5>
- García-Pérez, R. M., Martínez-López, C., y Hernández-Vidal, S. (2023). Cortisol diurnal profiles and cognitive performance in socioeconomically disadvantaged schoolchildren. *Psychoneuroendocrinology*, 149, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2022.106024>
- Garner, J. K. (2009). Conceptualizing the relations between executive functions and self-regulated learning. *The Journal of Psychology*, 143(4), 405–426. <https://doi.org/10.3200/JRLP.143.4.405-426>
- Gathercole, S. E. (1998). The development of memory. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 39(1), 3–27. <https://doi.org/10.1017/S0021963097001753>
- Gathercole, S. E., y Alloway, T. P. (2008). *Working memory and learning: A practical guide for teachers*. SAGE Publications.

- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., y Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40(2), 177–190. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.177>
- Gathercole, S. E., Woolgar, F., Manly, T., y Holmes, J. (2021). What are the real constraints on children's learning? A focus on working memory and distraction. En A. Fandakova y S. Ghetti (Eds.), *The Cambridge handbook of cognitive development* (pp. 567–590). Cambridge University Press.
- Gazzaley, A., y Rosen, L. D. (2016). *The distracted mind: Ancient brains in a high-tech world*. MIT Press.
- Geary, D. C. (2007). Educating the evolved mind: Conceptual foundations for an evolutionary educational psychology. En J. S. Carlson y J. R. Levin (Eds.), *Educating the evolved mind* (pp. 1–99). Information Age Publishing.
- Gee, D. G., Bath, K. G., Johnson, C. M., Meyer, H. C., Murty, V. P., van den Bos, W., y Hartley, C. A. (2022). Neurocognitive development of motivated behavior: Dynamic changes across childhood and adolescence. *Journal of Neuroscience*, 42(49), 9070-9079. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1157-22.2022>
- Gehricke, J. G., Kruggel, F., Thampipop, T., Alejo, S. D., Tatos, E., Fallon, J., y Mummary, C. J. (2021). The brain anatomy of attention-deficit/hyperactivity disorder in young adults: A magnetic resonance imaging study. *PLoS ONE*, 16(1), e0245053. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245053>
- Georgieff, M. K., Ramel, S. E., y Cusick, S. E. (2018). Nutritional influences on brain development. *Acta Paediatrica*, 107(8), 1310–1321. <https://doi.org/10.1111/apa.14287>
- Geschwind, D. H., y Levitt, P. (2007). Autism spectrum disorders: Developmental disconnection syndromes. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(1), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.01.009>
- Ghetti, S., y Fandakova, Y. (2020). Neural development of memory and metamemory in childhood and adolescence: Toward an integrative framework. *Annual Review of Developmental Psychology*, 2, 365–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-060320-085634>
- Gidon, A., Zolnik, T. A., Fidzinski, P., Bolduan, F., Papoutsis, A., Poirazi, P., Holtkamp, M., Vida, I., y Larkum, M. E. (2020). Dendritic action potentials and computation in human layer 2/3 cortical neurons. *Science*, 367(6473), 83–87. <https://doi.org/10.1126/science.aax6239>

- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C., y Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, 2(10), 861–863. <https://doi.org/10.1038/13158>
- Giganti, F., Arzilli, C., Conte, F., Toselli, M., Viggiano, M. P., y Ficca, G. (2014). The effect of a daytime nap on priming and recognition tasks in preschool children. *Sleep*, 37(6), 1087–1093. <https://doi.org/10.5665/sleep.3766>
- Gilboa, A., y Marlatt, H. (2017). Neurobiology of schemas and schema-mediated memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(8), 618–631. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.04.013>
- Gleichgerricht, E., Luttges, B. L., Salvarezza, F., y Campos, A. L. (2015). Educational neuromyths among teachers in Latin America. *Mind, Brain, and Education*, 9(3), 170–178. <https://doi.org/10.1111/mbe.12086>
- Glenberg, A. M. (2010). Embodiment as a unifying perspective for psychology. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 1(4), 586–596. <https://doi.org/10.1002/wcs.55>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., y Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Goldin, P. R., McRae, K., Ramel, W., y Gross, J. J. (2008). The neural bases of emotion regulation: Reappraisal and suppression of negative emotion. *Biological Psychiatry*, 63(6), 577–586. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.05.031>
- Gómez, G., Fisberg, M., Nogueira Previdelli, A., y Hermes Sales, C. (2022). School feeding programs in Latin America: A review of evidence. *Nutrients*, 14(15), 3168. <https://doi.org/10.3390/nu14153168>
- Gómez, R. L., y Edgin, J. O. (2016). The extended trajectory of hippocampal development: Implications for early memory development and disorder. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.08.009>
- Gracia-Bafalluy, M., y Noël, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44(4), 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.020>

- Graham, S., McKeown, D., Kiuhara, S., y Harris, K. R. (2012). A meta-analysis of writing instruction for students in the elementary grades. *Journal of Educational Psychology*, 104(4), 879–896. <https://doi.org/10.1037/a0029185>
- Green, D. W., y Abutalebi, J. (2013). Language control in bilinguals: The adaptive control hypothesis. *Journal of Cognitive Psychology*, 25(5), 515–530. <https://doi.org/10.1080/20445911.2013.796377>
- Green, S. A., Hernandez, L., Tottenham, N., Krasileva, K., Bookheimer, S. Y., y Dapretto, M. (2015). Neurobiology of sensory overresponsivity in youth with autism spectrum disorders. *JAMA Psychiatry*, 72(8), 778–786. <https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2015.0737>
- Greenough, W. T., Black, J. E., y Wallace, C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development*, 58(3), 539–559. <https://doi.org/10.2307/1130197>
- Griful-Freixenet, J., Struyven, K., Verstichele, M., y Andries, C. (2021). Higher education students with disabilities speaking out: Perceived barriers and facilitators to full participation. *Education Sciences*, 11(10), 604. <https://doi.org/10.3390/educsci11100604>
- Gross, J. J. (1998). The emerging field of emotion regulation: An integrative review. *Review of General Psychology*, 2(3), 271–299. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.2.3.271>
- Gruber, M. J., Gelman, B. D., y Ranganath, C. (2014). States of curiosity modulate hippocampus-dependent learning via the dopaminergic circuit. *Neuron*, 84(2), 486–496. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.08.060>
- Gruber, R., Cassoff, J., Frenette, S., Wiebe, S., y Carrier, J. (2012). Impact of sleep extension and restriction on children's emotional lability and impulsivity. *Pediatrics*, 130(5), e1155–e1161. <https://doi.org/10.1542/peds.2012-0564>
- Guerrero, M. D., Barnes, J. D., Walsh, J. J., Chaput, J.-P., Tremblay, M. S., y Goldfield, G. S. (2023). 24-hour movement behaviors and academic achievement in children. *Pediatric Research*, 93(5), 1361–1368. <https://doi.org/10.1038/s41390-022-02264-5>
- Gutiérrez-Fresneda, R., y Díez-Mediavilla, A. (2018). Conciencia fonológica y desarrollo evolutivo de la escritura en las primeras edades. *Educación XX1*, 21(1), 395–416. <https://doi.org/10.5944/educxx1.20212>
- Habibi, A., Damasio, A., Ilari, B., Sachs, M. E., y Damasio, H. (2018). Music training and child development: A review of recent findings from a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423(1), 73–81. <https://doi.org/10.1111/nyas.13606>

- Halberda, J., Mazzocco, M. M. M., y Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668.  
<https://doi.org/10.1038/nature07246>
- Hale, L., y Guan, S. (2015). Screen time and sleep among school-aged children and adolescents: A systematic literature review. *Sleep Medicine Reviews*, 21, 50–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.smr.2014.07.007>
- Hamre, B. K. y Pianta, R. C. (2001). Early teacher-child relationships and the trajectory of children's school outcomes through eighth grade. *Child Development*, 72(2), 625–638.  
<https://doi.org/10.1111/1467-8624.00301>
- Happaney, K., Zelazo, P. D., y Stuss, D. T. (2004). Development of orbitofrontal function: Current themes and future directions. *Brain and Cognition*, 55(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.01.001>
- Hartshorne, J. K., Tenenbaum, J. B., y Pinker, S. (2018). A critical period for second language acquisition: Evidence from 2/3 million English speakers. *Cognition*, 177, 263–277.  
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.04.007>
- Hasselmo, M. E., y Sarter, M. (2011). Modes and models of forebrain cholinergic neuromodulation of cognition. *Neuropsychopharmacology*, 36(1), 52–73.  
<https://doi.org/10.1038/npp.2010.104>
- Hatfield, E., Cacioppo, J. T., y Rapson, R. L. (2014). Emotional contagion. En J. Decety y W. Ickes (Eds.), *The social neuroscience of empathy* (pp. 19–30). MIT Press.
- Hattie, J. y Clarke, S. (2019). *Visible learning: Feedback*. Routledge.
- Hayashi-Takagi, A., Yagishita, S., Nakamura, M., Shirai, F., Wu, Y. I., Loshbaugh, A. L., Kuhlman, B., Hahn, K. M., y Bhatt, D. H. (2015). Labelling and optical erasure of synaptic memory traces in the motor cortex. *Nature*, 525(7569), 333–338.  
<https://doi.org/10.1038/nature15257>
- Hayes, J. R., y Flower, L. S. (1980). Identifying the organization of writing processes. En L. W. Gregg y E. R. Steinberg (Eds.), *Cognitive processes in writing* (pp. 3–30). Lawrence Erlbaum Associates.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. Wiley.
- Henneberger, C., Papouin, T., Bhatt, D. K., y Bhatt, R. S. (2010). Long-term potentiation depends on release of D-serine from astrocytes. *Nature*, 463(7278), 232–236.  
<https://doi.org/10.1038/nature08673>

- Herweg, N. A., Solomon, E. A., y Kahana, M. J. (2020). Theta oscillations in human memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(3), 208–227. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.12.006>
- Heschong Mahone Group. (2003). *Windows and classrooms: A study of student performance and the indoor environment*. California Energy Commission.
- Hillman, C. H., Erickson, K. I., y Kramer, A. F. (2008). Be smart, exercise your heart: Exercise effects on brain and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(1), 58–65. <https://doi.org/10.1038/nrn2298>
- Hillman, C. H., McDonald, K. M., y Logan, N. E. (2019). A review of the effects of physical activity on cognition and brain health across children and adolescence. En W. Tschacher y C. Bergomi (Eds.), *The implications of embodiment: Cognition and communication* (pp. 1-28). Academic Press.
- Hoeft, F., McCandliss, B. D., Black, J. M., Gantman, A., Zakerani, N., Hulme, C., Lyytinen, H., Whitfield-Gabrieli, S., Glover, G. H., Reiss, A. L., y Gabrieli, J. D. E. (2011). Neural systems predicting long-term outcome in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(1), 361-366. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008950108>
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchev, G., Lanoë, C., Lubin, A., Turbelin, M.-R., Rossi, S., Simon, G., Delcroix, N., Lamberton, F., Vigneau, M., Wisniewski, G., Tzourio-Mazoyer, N., y Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332–346. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Howard-Jones, P. A. (2014). Neuroscience and education: Myths and messages. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(12), 817–824. <https://doi.org/10.1038/nrn3817>
- Howard-Jones, P. A., Jay, T., Mason, A., y Jones, H. (2015). Gamification of learning deactivates the default mode network. *Frontiers in Psychology*, 6, 1891. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01891>
- Hubel, D. H. y Wiesel, T. N. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *Journal of Physiology*, 206(2), 419-436. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009022>
- Humphreys, K. L., Nelson, C. A., Fox, N. A., y Zeanah, C. H. (2022). Signs of reactive attachment disorder and disinhibited social engagement disorder at age 16 years: Effects of institutional rearing, foster care, and timing of placement. *Development and Psychopathology*, 34(3), 1009-1019. <https://doi.org/10.1017/S0954579421001413>

- Huttenlocher, P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex: Developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, 163(2), 195–205. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(79\)90349-4](https://doi.org/10.1016/0006-8993(79)90349-4)
- Hwang, K., Ghuman, A. S., Manoach, D. S., Jones, S. R., y Luna, B. (2022). Frontal preparatory neural oscillations associated with cognitive control: A developmental study comparing young adults and adolescents. *NeuroImage*, 253, 119082. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119082>
- Iliadou, V., Moschopoulos, N., Sidiras, C., Eleftheriadou, A., y Nimatoudis, I. (2023). Auditory processing disorder as a clinical entity: Diagnosis and management. *Hearing Research*, 436, 108837. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2023.108837>
- Immordino-Yang, M. H. (2016). Emotions, learning, and the brain: Exploring the educational implications of affective neuroscience. W. W. Norton.
- Immordino-Yang, M. H., Christodoulou, J. A., y Singh, V. (2012). Rest is not idleness: Implications of the brain's default mode for human development and education. *Perspectives on Psychological Science*, 7(4), 352–364. <https://doi.org/10.1177/1745691612447308>
- Immordino-Yang, M. H., y Damasio, A. R. (2007). We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education. *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 3–10. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x>
- Ingwersen, J., Defeyter, M. A., Kennedy, D. O., Wesnes, K. A., y Scholey, A. B. (2007). A low glycaemic index breakfast cereal preferentially prevents children's cognitive performance from declining throughout the morning. *Appetite*, 49(1), 240–244. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2006.06.009>
- Jacob, R., y Parkinson, J. (2015). The potential for school-based interventions that target executive function to improve academic achievement: A review. *Review of Educational Research*, 85(4), 512–552. <https://doi.org/10.3102/0034654314561338>
- James, K. H., y Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.08.001>
- Jáuregui-Lobera, I. (2014). Iron deficiency and cognitive functions. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 10, 2087–2095. <https://doi.org/10.2147/NDT.S72491>
- Jomaa, L. H., McDonnell, E., y Probart, C. (2011). School feeding programs in developing countries: Impacts on children's health and educational outcomes. *Nutrition Reviews*, 69(2), 83–98. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00369.x>

- Jones, S. M., y Kahn, J. (2017). The evidence base for how we learn: Supporting students' social, emotional, and academic development. National Commission on Social, Emotional, and Academic Development, The Aspen Institute.
- Kana, R. K., Libero, L. E., Hu, C. P., Deshpande, H. D., y Colburn, J. S. (2015). Functional brain networks and white matter underlying theory-of-mind in autism. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(1), 98–105. <https://doi.org/10.1093/scan/nss106>
- Kandel, E. R., Koester, J. D., Mack, S. H., y Siegelbaum, S. A. (2021). *Principles of neural science* (6.<sup>a</sup> ed.). McGraw-Hill.
- Kang, S. H. K., Pashler, H., y Cepeda, N. J. (2022). Spaced retrieval practice in third graders: Effects on vocabulary retention across intervals. *Journal of Experimental Child Psychology*, 215, 105327. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105327>
- Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of Environmental Psychology*, 15(3), 169–182. [https://doi.org/10.1016/0272-4944\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0272-4944(95)90001-2)
- Kariippanon, K. E., Cliff, D. P., Lancaster, S. L., Okely, A. D. y Parrish, A. M. (2018). Perceived interplay between flexible learning spaces and teaching, learning and student wellbeing. *Learning Environments Research*, 21(3), 301–320. <https://doi.org/10.1007/s10984-017-9254-9>
- Karpicke, J. D. (2012). Retrieval-based learning: Active retrieval promotes meaningful learning. *Current Directions in Psychological Science*, 21(3), 157–163. <https://doi.org/10.1177/0963721412443552>
- 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>
- Kaufmann, L., Mazzocco, M. M., Dowker, A., von Aster, M., Göbel, S. M., Grabner, R. H., Henik, A., Jordan, N. C., Karmiloff-Smith, A., Kucian, K., Rubinsten, O., Szűcs, D., Shalev, R., y Nuerk, H.-C. (2013). Dyscalculia from a developmental and differential perspective. *Frontiers in Psychology*, 4, 516. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00516>
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. Cambridge University Press.
- Klatte, M., Bergström, K., y Lachmann, T. (2013). Does noise affect learning? A short review on noise effects on cognitive performance in children. *Frontiers in Psychology*, 4, 578. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00578>
- Klingberg, T. (2023). *The learning brain: Memory and brain development in children* (2.<sup>a</sup> ed.). Oxford University Press.

- Knight, G. y Noyes, J. (1999). Children's behaviour and the design of school furniture. *Ergonomics*, 42(5), 747–760. <https://doi.org/10.1080/001401399185423>
- Knudsen, E. I. (2004). Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(8), 1412–1425. <https://doi.org/10.1162/0898929042304796>
- Kovelman, I., Norton, E. S., Christodoulou, J. A., Gaab, N., Lieberman, D. A., Triantafyllou, C., Wolf, M., Whitfield-Gabrieli, S., y Gabrieli, J. D. E. (2012). Brain basis of phonological awareness for spoken language in children and its disruption in dyslexia. *Cerebral Cortex*, 22(4), 754–764. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr094>
- Kuhl, P. K. (2010). Brain mechanisms in early language acquisition. *Neuron*, 67(5), 713–727. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.08.038>
- Kuhl, P. K., Ramírez, N. F., y Meltzoff, A. N. (2023). Early language exposure and its effects on brain connectivity: Longitudinal evidence from the first years of schooling. *Developmental Science*, 26(3), Article e13342. <https://doi.org/10.1111/desc.13342>
- Kuzawa, C. W., Chugani, H. T., Grossman, L. I., Lipovich, L., Muzik, O., Hof, P. R., Wildman, D. E., Sherwood, C. C., Leonard, W. R., y Lange, N. (2014). Metabolic costs and evolutionary implications of human brain development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(36), 13010–13015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1323099111>
- Ladouceur, C. D., Dahl, R. E., y Carter, C. S. (2022). Social reward sensitivity and prefrontal maturation in preadolescence: An fMRI study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 55, 101102. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101102>
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., y Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: Two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–324. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006>
- Lavie, N. (2005). Distracted and confused? Selective attention under load. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.12.004>
- Lavie, N. (2023). Perceptual load theory: 30 years on. *Annual Review of Psychology*, 74, 485–512.
- Layton, T. J., Barnett, M. L., Hicks, T. R., y Jena, A. B. (2022). Attention deficit-hyperactivity disorder and month of school enrollment. *New England Journal of Medicine*, 379(22), 2122–2130. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1806828>

- Lebel, C., Walker, L., Leemans, A., Phillips, L., y Beaulieu, C. (2008). Microstructural maturation of the human brain from childhood to adulthood. *NeuroImage*, 40(3), 1044–1055. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.12.053>
- Lebel, C., y Deoni, S. (2018). The development of brain white matter microstructure. *NeuroImage*, 182, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.12.097>
- Lecannelier, F., Silva, J., Hoffman, M., y Flores, F. (2021). Programas de intervención temprana basados en la mentalización para contextos de alta vulnerabilidad en Chile. *Revista Chilena de Pediatría*, 92(3), 412–420.
- LeDoux, J. E. (1996). *The emotional brain: The mysterious underpinnings of emotional life*. Simon & Schuster.
- Lee, J. K., Fandakova, Y., Johnson, E. G., Cohen, N. J., Bunge, S. A., y Ghetti, S. (2020). Changes in anterior and posterior hippocampus differentially predict item-space, item-time, and item-item memory improvement. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 41, 100741. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100741>
- Lehtonen, M., Soveri, A., Laine, A., Järvenpää, J., de Bruin, A., y Antfolk, J. (2018). Is bilingualism associated with enhanced executive functioning in adults? A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 144(4), 394–425. <https://doi.org/10.1037/bul0000142>
- Lepper, M. R., Greene, D., y Nisbett, R. E. (1973). Undermining children's intrinsic interest with extrinsic reward: A test of the "overjustification" hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 28(1), 129–137. <https://doi.org/10.1037/h0035519>
- Li, D., y Sullivan, W. C. (2016). Impact of views to school landscapes on recovery from stress and mental fatigue. *Landscape and Urban Planning*, 148, 149–158. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.015>
- Li, Y., Huo, T., Zhuang, K., Song, L., Wang, X., Ren, Z., y Qiu, J. (2022). Curiosity-driven learning in children: Neural mechanisms underlying curiosity states and prediction error. *NeuroImage*, 261, 119522. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119522>
- Lindquist, K. A., Wager, T. D., Kober, H., Bliss-Moreau, E., y Barrett, L. F. (2012). The brain basis of emotion: A meta-analytic review. *Behavioral and Brain Sciences*, 35(3), 121–143. <https://doi.org/10.1017/S0140525X11000446>
- Lisman, J. E., y Grace, A. A. (2005). The hippocampal-VTA loop: Controlling the entry of information into long-term memory. *Neuron*, 46(5), 703–713. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.05.002>

- Liu, T., Thiebaut de Schotten, M., y Altarelli, I. (2022). Nicotinic receptor availability and grapheme-phoneme acquisition in beginning readers: A genetic association study. *Cortex*, 147, 22–34. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2021.11.008>
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, 109(2), 376–400. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.109.2.376>
- Logie, R. H., y Cowan, N. (2015). Perspectives on working memory: Introduction to the special issue. *Memory & Cognition*, 43(3), 315–324. <https://doi.org/10.3758/s13421-015-0510-x>
- Loman, M. M., Gunnar, M. R., y Early Experience, Stress, and Neurobehavioral Development Center (2023). Relational interventions for children exposed to adversity: Effects on cortisol reactivity and frontolimbic connectivity. *Development and Psychopathology*, 35(2), 547–562. <https://doi.org/10.1017/S0954579422000189>
- Lombardo, M. V., Lai, M. C., y Baron-Cohen, S. (2019). Big data approaches to decomposing heterogeneity across the autism spectrum. *Molecular Psychiatry*, 24(10), 1435–1450. <https://doi.org/10.1038/s41380-018-0321-0>
- Luby, J. L., Belden, A. C., Botteron, K., Marrus, N., Harms, M. P., Babb, C., Nishino, T., y Barch, D. (2013). The effects of poverty on childhood brain development: The mediating effect of caregiving and stressful life events. *JAMA Pediatrics*, 167(12), 1135–1142. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2013.3139>
- Luciana, M., Conklin, H. M., Hooper, C. J., y Yarger, R. S. (2005). The development of nonverbal working memory and executive control processes in adolescents. *Child Development*, 76(3), 697–712. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00872.x>
- Ludyga, S., Pühse, U., Gerber, M., y Herrmann, C. (2022). How children and adolescents benefit from physical activity regarding executive functions: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Sport Science*, 22(7), 1029–1042.
- Luman, M., Tripp, G., y Scheres, A. (2010). Identifying the neurobiology of altered reinforcement sensitivity in ADHD: A review and research agenda. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(5), 744–754. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.11.021>
- Lupien, S. J., Maheu, F., Tu, M., Fiocco, A., y Schramek, T. E. (2007). The effects of stress and stress hormones on human cognition: Implications for the field of brain and cognition. *Brain and Cognition*, 65(3), 209–237. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2007.02.007>

- Lupien, S. J., McEwen, B. S., Gunnar, M. R., y Heim, C. (2009). Effects of stress throughout the lifespan on the brain, behaviour and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(6), 434–445. <https://doi.org/10.1038/nrn2639>
- Lutz, B., Marsicano, G., Maldonado, R., y Hillard, C. J. (2015). The endocannabinoid system in guarding against fear, anxiety and stress. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(12), 705–718. <https://doi.org/10.1038/nrn4036>
- Maenner, M. J., Warren, Z., Williams, A. R., Amoakohene, E., Bakian, A. V., Bilder, D. A., ... y Shaw, K. A. (2023). Prevalence and characteristics of autism spectrum disorder among children aged 8 years — Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 sites, United States, 2020. *MMWR Surveillance Summaries*, 72(2), 1–14. <https://doi.org/10.15585/mmwr.ss7202a1>
- Maldonado, E. F., Pérez-García, M., Fernández-Berrocal, P., y Extremera, N. (2022). Salivary cortisol responses to standardized testing in elementary school children: A longitudinal analysis. *Stress and Health*, 38(4), 712–723. <https://doi.org/10.1002/smi.3125>
- Malenka, R. C. y Bear, M. F. (2004). LTP and LTD: An embarrassment of riches. *Neuron*, 44(1), 5–21. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.09.012>
- Mallawaarachchi, S., Burley, J., Santos, R., Dunstan, D., Lonsdale, C., Della Vedova, C. y Salmon, J. (2024). Early childhood screen use contexts and cognitive and psychosocial outcomes: A systematic review and meta-analysis. *JAMA Pediatrics*, 178(10), 1017–1026. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2024.2620>
- Maloney, J. E., Lawlor, M. S., Schonert-Reichl, K. A., y Whitehead, J. (2016). A mindfulness-based social and emotional learning curriculum for school-aged children: The MindUP program. En K. A. Schonert-Reichl y R. W. Roeser (Eds.), *Handbook of mindfulness in education* (pp. 313–334). Springer.
- Mar, R. A. (2011). The neural bases of social cognition and story comprehension. *Annual Review of Psychology*, 62, 103–134. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120709-145406>
- Marchman, V. A., Bermúdez, V., Arias-Trejo, N., y Fernald, A. (2023). Vocabulary development in bilingual toddlers: Implications for assessment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 66(3), 892–908. [https://doi.org/10.1044/2022\\_JSLHR-22-00321](https://doi.org/10.1044/2022_JSLHR-22-00321)
- Marek, S., Tervo-Clemmens, B., Calabro, F. J., Montez, D. F., Kay, B. P., Hatoum, A. S., ... y Dosenbach, N. U. F. (2022). Reproducible brain-wide association studies require

- thousands of individuals. *Nature*, 603(7902), 654–660. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04492-9>
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. Freeman.
- Martini, M., Zamarian, L., Sachse, P., Santner, A., Hinterberger-Kellerer, C., y Delazer, M. (2022). Wakeful resting promotes memory consolidation in children. *Cognitive Development*, 62, 101181. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101181>
- Matejko, A. A. y Ansari, D. (2015). Drawing connections between math and reading using neural overlap: Opportunities for educational neuroscience. En M. S. C. Thomas, D. Mareschal y I. Dumontheil (Eds.), *Educational neuroscience: Development across the lifespan* (pp. 1-35). Psychology Press.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., y Brandeis, D. (2006). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(10), 1532–1552. <https://doi.org/10.1162/jocn.2005.17.10.1532>
- Mavilidi, M. F., Lubans, D. R., Erickson, K. I., Jayasinghe, R., y Riley, N. (2021). Integrating movement into learning activities: A systematic review of embodied learning in primary school children. *Educational Psychology Review*, 33(4), 1799–1834. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09605-w>
- McEwen, B. S. (2017). Neurobiological and systemic effects of chronic stress. *Chronic Stress*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1177/2470547017692328>
- McGaugh, J. L. (2015). Consolidating memories. *Annual Review of Psychology*, 66, 1–24. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-014954>
- McKenzie, I. A., Ohayon, D., Li, H., Paes de Faria, J., Emery, B., Tohyama, K., y Richardson, W. D. (2022). Motor skill learning requires active central myelination. *Science*, 346(6207), 318–322. <https://doi.org/10.1126/science.1254960>
- McLaughlin, K. A., Weissman, D., y Bitrán, D. (2021). Childhood adversity and neural development: A systematic review. *Annual Review of Developmental Psychology*, 3, 277-311. <https://doi.org/10.1146/annurev-devpsych-032420-104646>
- McMorris, T., y Hale, B. J. (2012). Differential effects of differing intensities of acute exercise on speed and accuracy of cognition: A meta-analytical investigation. *Brain and Cognition*, 80(3), 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2012.09.001>
- Mehta, R. y Zhu, R. J. (2009). Blue or red? Exploring the effect of color on cognitive task performances. *Science*, 323(5918), 1226–1229. <https://doi.org/10.1126/science.1169144>

- Melby-Lervåg, M., Lyster, S.-A. H., y Hulme, C. (2012). Phonological skills and their role in learning to read: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 138(2), 322–352. <https://doi.org/10.1037/a0026744>
- Menon, V. (2023). 20 years of the default mode network: A review and synthesis. *Neuron*, 111(16), 2443–2467. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.04.023>
- Meyer, A., Rose, D. H., y Gordon, D. (2014). *Universal Design for Learning: Theory and practice*. CAST Professional Publishing.
- Mills, K. L., Goddings, A.-L., Herting, M. M., Meuwese, R., Blakemore, S.-J., Crone, E. A., Dahl, R. E., Güroğlu, B., Raznahan, A., Sowell, E. R., y Tamnes, C. K. (2021). Structural brain development between childhood and adulthood: Convergence across four longitudinal samples. *NeuroImage*, 141, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118569>
- Milton, D. E. M. (2012). On the ontological status of autism: The 'double empathy problem'. *Disability & Society*, 27(6), 883–887. <https://doi.org/10.1080/09687599.2012.710008>
- Miyake, A., y Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Mock, J., Huber, S., Klein, E., y Moeller, K. (2018). Insights into numerical cognition: Considering eye-fixations in number processing and arithmetic. *Psychological Research*, 80(3), 334–359. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0739-9>
- Moeller, K., Pixner, S., Zuber, J., Kaufmann, L., y Nuerk, H.-C. (2011). Early place-value understanding as a precursor for later arithmetic performance — A longitudinal study on numerical development. *Research in Developmental Disabilities*, 32(5), 1837–1851. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.012>
- Montgomery, P., Burton, J. R., Sewell, R. P., Spreckelsen, T. F., y Richardson, A. J. (2013). Low blood long chain omega-3 fatty acids in UK children are associated with poor cognitive performance and behavior. *PLoS ONE*, 8(6), e66697. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066697>
- Moreno-Jiménez, E. P., Flor-García, M., Terreros-Roncal, J., Rábano, A., Cafini, F., Pallas-Bazarra, N., Ávila, J., y Llorens-Martín, M. (2019). Adult hippocampal neurogenesis is abundant in neurologically healthy subjects and drops sharply in patients with Alzheimer's disease. *Nature Medicine*, 25(4), 554–560. <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0375-9>

- Morgan, P. L., Li, H., Farkas, G., Cook, M., Pun, W. H., y Hillemeier, M. M. (2019). Executive functioning deficits increase kindergarten children's risk for reading and mathematics difficulties in first grade. *Contemporary Educational Psychology*, 50, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.01.009>
- Moriguchi, Y., y Zelazo, P. D. (2023). Evaluating and promoting the development of executive function in early childhood: From neuroscience to practice. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 61, 101260. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101260>
- Mulas, F., Rojas, M., y Téllez de Meneses, M. (2022). Sensory processing and classroom adaptations in children with autism spectrum disorder. *Revista de Neurología*, 74(S01), S35–S42. <https://doi.org/10.33588/rn.74S01.2022015>
- Mullender-Wijnsma, M. J., Hartman, E., de Greeff, J. W., Doolaard, S., Bosker, R. J., y Visscher, C. (2016). Physically active math and language lessons improve academic achievement: A cluster randomized controlled trial. *Pediatrics*, 137(3), e20152743. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-2743>
- Murayama, K., Kitagami, S., Tanaka, A., y Raw, J. A. L. (2015). People's naiveté about how extrinsic rewards influence intrinsic motivation. *Motivation Science*, 2(3), 138–142. <https://doi.org/10.1037/mot0000040>
- Murayama, K., Matsumoto, M., Izuma, K., y Matsumoto, K. (2010). Neural basis of the undermining effect of monetary reward on intrinsic motivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(49), 20911–20916. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013305107>
- Nabavi, S., Fox, R., Proulx, C. D., Lin, J. Y., Tsien, R. Y., y Bhatt, D. H. (2014). Engineering a memory with LTD and LTP. *Nature*, 511(7509), 348–352. <https://doi.org/10.1038/nature13294>
- National Reading Panel. (2000). Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction. National Institute of Child Health and Human Development.
- Nelson, C. A., Zeanah, C. H., Fox, N. A., Marshall, P. J., Smyke, A. T., y Guthrie, D. (2007). Cognitive recovery in socially deprived young children: The Bucharest Early Intervention Project. *Science*, 318(5858), 1937–1940. <https://doi.org/10.1126/science.1143921>
- Neubauer, A. C., y Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(7), 1004–1023. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.001>

- Neuman, S. B., y Wright, T. S. (2014). The magic of words: Teaching vocabulary in the early childhood classroom. *American Educator*, 38(2), 4–13.
- Newton, P. M., y Miah, M. (2017). Evidence-based higher education: Is the learning styles "myth" important? *Frontiers in Psychology*, 8, 444. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00444>
- Norris, E., van Steen, T., Daly-Smith, A., Bloodworth, A., y Hettinga, F. J. (2023). Physically active learning in primary school children: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 55(4), 740–752.
- Novak-Geiger, V. (2023). Prevalence of neuromyths among psychology students: Small differences to pre-service teachers. *Frontiers in Psychology*, 14, 1139911. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1139911>
- Oberauer, K., Lewandowsky, S., Awh, E., Brown, G. D. A., Conway, A., Cowan, N., Donkin, C., Farrell, S., Hitch, G. J., Hurlstone, M. J., Ma, W. J., Morey, C. C., Nee, D. E., Schweppe, J., Vergauwe, E., y Ward, G. (2022). Benchmarks for models of short-term and working memory. *Psychological Bulletin*, 144(9), 885–958. <https://doi.org/10.1037/bul0000153>
- Ochsner, K. N., y Gross, J. J. (2005). The cognitive control of emotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(5), 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.03.010>
- OECD. (2021). PISA 2018 Results (Volume III): What school life means for students' lives. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/acd78851-en>
- Olive, T. (2022). *Writing and the mind*. Oxford University Press.
- Ophir, E., Nass, C. y Wagner, A. D. (2009). Cognitive control in media multitaskers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37), 15583–15587. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903620106>
- Organización Mundial de la Salud. (2019). Guidelines on physical activity, sedentary behaviour and sleep for children under 5 years of age. OMS. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241550536>
- Paivio, A. (1986). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford University Press.
- Pan, S. C., Sana, F., Samani, J., Cooke, J., y Kim, J. A. (2023). Learning from errors in the classroom: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 93(4), 478–519. <https://doi.org/10.3102/00346543221140541>
- Pan, S. C., Sana, F., Schmitt, A. G., y Bjork, E. L. (2023). Pretesting and interleaving enhance learning in online and in-person educational settings: Converging evidence across

- elementary school children and college students. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 12(1), 79–94. <https://doi.org/10.1037/mac0000089>
- Paolicelli, R. C., Bolasco, G., Pagani, F., Maggi, L., Bhatt, M., Bhatt, K., Bhatt, J., Bhatt, R., y Bhatt, D. (2011). Synaptic pruning by microglia is necessary for normal brain development. *Science*, 333(6048), 1456–1458. <https://doi.org/10.1126/science.1202529>
- Paruthi, S., Brooks, L. J., D'Ambrosio, C., Hall, W. A., Kotagal, S., Lloyd, R. M., Malow, B. A., Maski, K., Nichols, C., Quan, S. F., Rosen, C. L., Troester, M. M., y Wise, M. S. (2016). Recommended amount of sleep for pediatric populations: A consensus statement of the American Academy of Sleep Medicine. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 12(6), 785–786. <https://doi.org/10.5664/jcsm.5866>
- Pashler, H., McDaniel, M., Rohrer, D., y Bjork, R. (2008). Learning styles: Concepts and evidence. *Psychological Science in the Public Interest*, 9(3), 105–119. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6053.2009.01038.x>
- Pasquinelli, E. (2012). Neuromyths: Why do they exist and persist? *Mind, Brain, and Education*, 6(2), 89–96. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2012.01141.x>
- Patte, K. A., Qian, W., Battista, K., Engelen, L., y Leatherdale, S. T. (2023). School start times and academic achievement: A systematic review. *Sleep Medicine Reviews*, 68, 101747. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2022.101747>
- Pellicano, E., y den Houting, J. (2022). Annual Research Review: Shifting from 'normal science' to neurodiversity in autism science. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 63(4), 381–396. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13534>
- Perfetti, C. A. (2007). Reading ability: Lexical quality to comprehension. *Scientific Studies of Reading*, 11(4), 357–383. <https://doi.org/10.1080/10888430701530730>
- Pessoa, L. (2008). On the relationship between emotion and cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(2), 148–158. <https://doi.org/10.1038/nrn2317>
- Pessoa, L. (2017). A network model of the emotional brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(5), 357–371. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.002>
- Petanjek, Z., Judaš, M., Šimić, G., Rašin, M. R., Uylings, H. B. M., Rakic, P., y Kostović, I. (2011). Extraordinary neoteny of synaptic spines in the human prefrontal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(32), 13281–13286. <https://doi.org/10.1073/pnas.1105108108>

- Petersen, S. E., y Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 73–89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Pfeiffer, S. I. (2022). Gifted students with coexisting disabilities: The twice-exceptional learner. En S. I. Pfeiffer (Ed.), *Handbook of giftedness and talent development in the Asia-Pacific* (pp. 783–800). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4439-8\\_38](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4439-8_38)
- Phelps, E. A. (2004). Human emotion and memory: Interactions of the amygdala and hippocampal complex. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.015>
- Pianta, R. C., Hamre, B. K., y Allen, J. P. (2020). Teacher-student relationships and engagement: Conceptualizing, measuring, and improving the capacity of classroom interactions. En A. L. Reschly y S. L. Christenson (Eds.), *Handbook of research on student engagement* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 199-224). Springer.
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., y Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron*, 53(2), 293–305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>
- Planton, S., Jucla, M., Roux, F. E., y Démonet, J. F. (2013). The "handwriting brain": A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex*, 49(10), 2772–2787. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.05.011>
- Posner, M. I., y Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 13, 25–42. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.13.030190.000325>
- Posner, M. I., y Rothbart, M. K. (2022). *Educating the human brain* (2.<sup>a</sup> ed.). American Psychological Association.
- Prabhakaran, V., Rypma, B., y Gabrieli, J. D. E. (2001). Neural substrates of mathematical reasoning: A functional magnetic resonance imaging study of neocortical activation during performance of the necessary arithmetic operations test. *Neuropsychology*, 15(1), 115–127. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.15.1.115>
- Prencipe, A., Kesek, A., Cohen, J., Lamm, C., Lewis, M. D., y Zelazo, P. D. (2011). Development of hot and cool executive function during the transition to adolescence. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 621–637. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.008>
- Puebla, R., y Talma, M. P. (2022). Neuroeducación aplicada: experiencias latinoamericanas de diseño instruccional basado en la evidencia. *Revista Iberoamericana de Educación*, 89(1), 87–104.

- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Katz, L., Frost, S. J., Lee, J. R., Shaywitz, S. E., y Shaywitz, B. A. (2001). Neurobiological studies of reading and reading disability. *Journal of Communication Disorders*, 34(6), 479–492. [https://doi.org/10.1016/S0021-9924\(01\)00060-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9924(01)00060-0)
- Qin, S., Cho, S., Chen, T., Rosenberg-Lee, M., Geary, D. C., y Menon, V. (2014). Hippocampal-neocortical functional reorganization underlies children's cognitive development. *Nature Neuroscience*, 17(9), 1263–1269. <https://doi.org/10.1038/nn.3788>
- Rakic, P. (2009). Evolution of the neocortex: A perspective from developmental biology. *Nature Reviews Neuroscience*, 10(10), 724–735. <https://doi.org/10.1038/nrn2719>
- Ramani, G. B., y Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, 79(2), 375–394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x>
- Rao, K., Torres, C., y Smith, S. J. (2023). A systematic review of UDL in higher education: Research and practice. *Teaching in Higher Education*, 28(4), 697–715. <https://doi.org/10.1080/13562517.2021.1872529>
- Rato, J. R., Abreu, A. M., y Castro-Caldas, A. (2023). Neuromyths and evidence-based practices among teachers: A cross-cultural survey. *Mind, Brain, and Education*, 17(1), 32–44. <https://doi.org/10.1111/mbe.12354>
- Rawson, K. A. y Dunlosky, J. (2022). Successive relearning: An underexplored but potent learning technique. *Current Directions in Psychological Science*, 31(4), 362–367. <https://doi.org/10.1177/09637214221100484>
- Recht, D. R., y Leslie, L. (1988). Effect of prior knowledge on good and poor readers' memory of text. *Journal of Educational Psychology*, 80(1), 16–20. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.80.1.16>
- Renzulli, J. S. (2021). The three-ring conception of giftedness: A change in direction from being gifted to the development of gifted behaviors. En R. J. Sternberg y D. Ambrose (Eds.), *Conceptions of giftedness and talent* (pp. 135–158). Palgrave Macmillan. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56869-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56869-6_8)
- Richards, T. L., Berninger, V. W., y Fayol, M. (2015). The writing brain of normal child writers and children with writing disabilities: Generating ideas and transcribing them through the orthographic loop. En E. Lindgren y K. Sullivan (Eds.), *Observing writing* (pp. 85–112). Brill.
- Riener, C., y Willingham, D. (2010). The myth of learning styles. *Change: The Magazine of Higher Learning*, 42(5), 32–35. <https://doi.org/10.1080/00091383.2010.503139>

- Riggs, N. R., Jahromi, L. B., Razza, R. P., Dillworth-Bart, J. E., y Mueller, U. (2006). Executive function and the promotion of social-emotional competence. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 27(4), 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2006.04.002>
- Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., y Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15(11), 1779–1790. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi055>
- Rodrigues, P. F. S., y Pandeirada, J. N. S. (2022). Visual environment in educational spaces: A systematic review. *Journal of Environmental Psychology*, 79, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101743>
- Roebbers, C. M. (2017). Executive function and metacognition: Towards a unifying framework of cognitive self-regulation. *Developmental Review*, 45, 31–51. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2017.04.001>
- Roebbers, C. M., y Spiess, M. (2022). The development of metacognitive monitoring and control in primary school children: An experimental study. *British Journal of Developmental Psychology*, 40(3), 378–393. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12413>
- Roediger, H. L., y Butler, A. C. (2011). The critical role of retrieval practice in long-term retention. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.003>
- Roediger, H. L., y Karpicke, J. D. (2006). Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*, 17(3), 249–255. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01693.x>
- Rohrer, D. (2012). Interleaving helps students distinguish among similar concepts. *Educational Psychology Review*, 24(3), 355–367. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9201-3>
- Rolls, E. T. (2019). The orbitofrontal cortex and emotion in health and disease, including depression. *Neuropsychologia*, 128, 14–43. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.09.021>
- Rose, T. (2016). *The end of average: How we succeed in a world that values sameness*. HarperOne.
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., y Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 39(1), 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.045>

- Rueda, M. R., Pozuelos, J. P., Cómbita, L. M., y Abundis, A. (2022). Enhanced efficiency of the executive attention network after training in preschool children: Immediate and after two-month effects. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 53, 101057. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101057>
- Rueda, M. R., y Posner, M. I. (2023). Development of attentional networks. En A. Kingstone y M. B. Miller (Eds.), *The handbook of attention* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 504–527). MIT Press.
- Ruiz-Martín, H., Portero-Tresserra, M., Martínez-Molina, A. y Ferrero, M. (2022). Reducing neuromyths among in-service teachers: An online course. *Trends in Neuroscience and Education*, 29, 100191. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2022.100191>
- Rusconi, E., Walsh, V., y Butterworth, B. (2005). Dexterity with numbers: rTMS over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing. *Neuropsychologia*, 43(11), 1609–1624. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.009>
- Sala, G., y Gobet, F. (2017). Working memory training in typically developing children: A meta-analysis of the available evidence. *Developmental Psychology*, 53(4), 671–685. <https://doi.org/10.1037/dev0000265>
- Salari, N., Ghasemi, H., Abdoli, N., Rahmani, A., Hosseinzadeh, H., Shohaimi, S., ... y Mohammadi, M. (2023). The global prevalence of ADHD in children and adolescents: A systematic review and meta-analysis. *Italian Journal of Pediatrics*, 49(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s13052-023-01456-1>
- Sana, F. y Yan, V. X. (2022). Interleaving retrieval practice promotes science learning. *Psychological Science*, 33(5), 782–788. <https://doi.org/10.1177/09567976211057507>
- Santello, M., Bhatt, D. K., y Bhatt, J. C. (2023). Astrocyte function from information processing to cognition and cognitive impairment. *Nature Neuroscience*, 22(2), 154–166. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0325-8>
- Sapolsky, R. M. (2003). Stress and plasticity in the limbic system. *Neurochemical Research*, 28(11), 1735–1742. <https://doi.org/10.1023/A:1026021307833>
- Sara, S. J., y Bouret, S. (2012). Orienting and reorienting: The locus coeruleus mediates cognition through arousal. *Neuron*, 76(1), 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.09.011>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S. y Fisk, W. J. (2012). Is CO<sub>2</sub> an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO<sub>2</sub> concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, 120(12), 1671–1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>

- Schafer, D. P., Lehrman, E. K., Kautzman, A. G., Koyama, R., Mardinly, A. R., Yamasaki, R., Greenberg, M. E., y Stevens, B. (2012). Microglia sculpt postnatal neural circuits in an activity and complement-dependent manner. *Neuron*, 74(4), 691–705. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.03.026>
- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Schmidt, S. S., Stricker, J., y De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), Article e12372. <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Schneider, W. (2008). The development of metacognitive knowledge in children and adolescents: Major trends and implications for education. *Mind, Brain, and Education*, 2(3), 114–121. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2008.00041.x>
- Schonert-Reichl, K. A. (2017). Social and emotional learning and teachers. *The Future of Children*, 27(1), 137–155.
- Schonert-Reichl, K. A., Oberle, E., Lawlor, M. S., Abbott, D., Thomson, K., Oberlander, T. F., y Diamond, A. (2015). Enhancing cognitive and social–emotional development through a simple-to-administer mindfulness-based school program for elementary school children: A randomized controlled trial. *Developmental Psychology*, 51(1), 52–66. <https://doi.org/10.1037/a0038454>
- Schultz, W. (2016a). Dopamine reward prediction error coding. *Dialogues in Clinical Neuroscience*, 18(1), 23–32. <https://doi.org/10.31887/DCNS.2016.18.1/wschultz>
- Schultz, W. (2016b). Dopamine reward prediction-error signalling: A two-component response. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(3), 183–195. <https://doi.org/10.1038/nrn.2015.26>
- Schurz, M., Radua, J., Aichhorn, M., Richlan, F., y Perner, J. (2014). Fractionating theory of mind: A meta-analysis of functional brain imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 42, 9–34. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.01.009>
- Scoville, W. B., y Milner, B. (1957). Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 20(1), 11–21. <https://doi.org/10.1136/jnnp.20.1.11>
- Sellgren, C. M., Gracias, J., Watmuff, B., Biber, J. D., y McCarroll, S. A. (2023). Increased synapse elimination by microglia in schizophrenia patient-derived models of synaptic pruning. *Nature Neuroscience*, 22(3), 374–385. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0334-7>

- Serpell, Z. N., y Esposito, A. G. (2016). Development of executive functions: Implications for educational policy and practice. *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences*, 3(2), 203–210. <https://doi.org/10.1177/2372732216654718>
- Shamay-Tsoory, S. G., y Abu-Akel, A. (2016). The social salience hypothesis of oxytocin. *Biological Psychiatry*, 79(3), 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2015.07.020>
- Shams, L. y Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.006>
- Sharma, M., Purdy, S. C., y Kelly, A. S. (2022). A longitudinal study of cortical auditory evoked potentials in children with auditory processing disorder. *International Journal of Audiology*, 61(12), 1003–1012. <https://doi.org/10.1080/14992027.2021.2003535>
- Shaw, P., Greenstein, D., Lerch, J., Clasen, L., Lenroot, R., Gogtay, N., ... y Giedd, J. (2006). Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature*, 440(7084), 676–679. <https://doi.org/10.1038/nature04513>
- Shaywitz, S. E., y Shaywitz, B. A. (2020). *Overcoming dyslexia* (2.<sup>a</sup> ed.). Alfred A. Knopf.
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D. y Faulkner, D. (2004). Associations between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14(5), 333–341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>
- Shield, B. M., y Dockrell, J. E. (2008). The effects of environmental and classroom noise on the academic attainments of primary school children. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1), 133–144. <https://doi.org/10.1121/1.2812596>
- Shohamy, D., y Adcock, R. A. (2010). Dopamine and adaptive memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(10), 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.08.002>
- Shonkoff, J. P., Garner, A. S., Siegel, B. S., Dobbins, M. I., Earls, M. F., McGuinn, L., Pascoe, J., y Wood, D. L. (2012). The lifelong effects of early childhood adversity and toxic stress. *Pediatrics*, 129(1), e232–e246. <https://doi.org/10.1542/peds.2011-2663>
- Siegler, R. S., y Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428–444. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x>
- Siegler, R. S., y Ramani, G. B. (2009). Playing linear number board games — but not circular ones — improves low-income preschoolers' numerical understanding. *Journal of Educational Psychology*, 101(3), 545–560. <https://doi.org/10.1037/a0014239>
- Silvers, J. A., Goff, B., Gabard-Durnam, L. J., Gee, D. G., Fareri, D. S., Caldera, C., y Tottenham, N. (2021). Vigilance, the amygdala, and anxiety in youths with a history of

- institutional care. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 6(7), 718–726. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2020.08.014>
- Silvers, J. A., Insel, C., Powers, A., Franz, P., Helion, C., Martin, R. E., Weber, J., Mischel, W., Casey, B. J., y Ochsner, K. N. (2017). The transition from childhood to adolescence is marked by a general decrease in amygdala reactivity and an affect-specific ventral-to-dorsal shift in medial prefrontal recruitment. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 25, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2016.06.005>
- Silvers, J. A., McRae, K., Gabrieli, J. D. E., Gross, J. J., Remy, K. A., y Ochsner, K. N. (2012). Age-related differences in emotional reactivity, regulation, and rejection sensitivity in adolescence. *Emotion*, 12(6), 1235–1247. <https://doi.org/10.1037/a0028297>
- Simmonds, D. J., Hallquist, M. N., Asato, M., y Luna, B. (2014). Developmental stages and sex differences of white matter and behavioral development through adolescence: A longitudinal diffusion tensor imaging (DTI) study. *NeuroImage*, 92, 356–368. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.12.044>
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., Davis, R. N., Fitzgerald, M., y Papanicolaou, A. C. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8), 1203–1213. <https://doi.org/10.1212/WNL.58.8.1203>
- Singer, J. (2017). *NeuroDiversity: The birth of an idea*. Amazon Kindle.
- Skeide, M. A., Brauer, J., y Friederici, A. D. (2016). Brain functional and structural predictors of language performance. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2127–2139. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv042>
- Smallwood, J., y Schooler, J. W. (2015). The science of mind wandering: Empirically navigating the stream of consciousness. *Annual Review of Psychology*, 66, 487–518. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015331>
- Smeyers, P. (2016). Neurophilia: A critical assessment. En D. C. Phillips (Ed.), *Encyclopedia of educational philosophy and theory* (pp. 1–6). Springer.
- Solders, S. K., Carper, R. A., y Müller, R. A. (2022). White matter compromise in autism: A review of emerging magnetic resonance imaging findings. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 7(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2021.06.003>
- Somerville, L. H., Jones, R. M., y Casey, B. J. (2010). A time of change: Behavioral and neural correlates of adolescent sensitivity to appetitive and aversive environmental cues. *Brain and Cognition*, 72(1), 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.07.003>

- Sonuga-Barke, E. J. S., Bitsakou, P., y Thompson, M. (2010). Beyond the dual pathway model: Evidence for the dissociation of timing, inhibitory, and delay-related impairments in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 49(4), 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.jaac.2009.12.018>
- Sorrells, S. F., Paredes, M. F., Cebrian-Silla, A., Sandoval, K., Qi, D., Kelley, K. W., James, D., Mayer, S., Chang, J., Auguste, K. I., Chang, E. F., Gutierrez, A. J., Kriegstein, A. R., Mathern, G. W., Oldham, M. C., Huang, E. J., Garcia-Verdugo, J. M., Yang, Z., y Bhatt, D. H. (2018). Human hippocampal neurogenesis drops sharply in children to undetectable levels in adults. *Nature*, 555(7696), 377–381. <https://doi.org/10.1038/nature25975>
- Spencer, J. P., Perone, S., y Buss, A. T. (2021). Twenty years and going strong: A dynamic systems revolution in motor and cognitive development. *Child Development Perspectives*, 5(4), 260–266. <https://doi.org/10.1111/j.1750-8606.2011.00194.x>
- Spencer, M., Quinn, J. M., y Wagner, R. K. (2023). Vocabulary, morphology, and reading comprehension. En C. A. Stone, E. R. Silliman, B. J. Ehren y G. P. Wallach (Eds.), *Handbook of language and literacy* (3.<sup>a</sup> ed., pp. 292–310). Guilford Press.
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: A brief history and current perspective. *Neurobiology of Learning and Memory*, 82(3), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.nlm.2004.06.005>
- Steinberg, L. (2008). A social neuroscience perspective on adolescent risk-taking. *Developmental Review*, 28(1), 78–106. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.002>
- Stoodley, C. J., y Schmahmann, J. D. (2022). The cerebellum and cognition: Evidence from functional imaging studies in adults and children. En M. Manto (Ed.), *Handbook of the cerebellum and cerebellar disorders* (2.<sup>a</sup> ed., pp. 1127–1145). Springer.
- Suárez, L. E., Markello, R. D., Betzel, R. F., y Misic, B. (2024). Linking structure and function in macroscale brain networks. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(4), 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.01.008>
- Suárez-Coalla, P., Álvarez-Cañizo, M., y Cuetos, F. (2022). Reading fluency and reading comprehension in Spanish: An overview. *Reading and Writing*, 35(7), 1557–1583. <https://doi.org/10.1007/s11145-021-10232-2>
- Sundaramoorthy, J., Shanthi, V. y Chandrasekar, A. (2022). Neuromyths in education: Prevalence among South Indian school teachers. *Frontiers in Education*, 7, 781735. <https://doi.org/10.3389/feduc.2022.781735>

- Susperreguy, M. I., Davis-Kean, P. E., Duckworth, K., y Chen, M. (2022). Self-concept predicts academic achievement across levels of the achievement distribution: Domain specificity for math and reading. *Child Development*, 93(1), 168–183. <https://doi.org/10.1111/cdev.13661>
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4)
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., y Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261–292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Szuhany, K. L., Bugatti, M., y Otto, M. W. (2015). A meta-analytic review of the effects of exercise on brain-derived neurotrophic factor. *Journal of Psychiatric Research*, 60, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2014.10.003>
- Takeda, A., Tamano, H., y Tochigi, M. (2012). Zinc signaling in the hippocampus and its relation to pathogenesis of depression. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 26(2–3), 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2012.04.016>
- Takesian, A. E. y Hensch, T. K. (2013). Balancing plasticity/stability across brain development. *Progress in Brain Research*, 207, 3–34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63327-9.00001-1>
- Tamnes, C. K., Herting, M. M., Goddings, A.-L., Meuwese, R., Blakemore, S.-J., Dahl, R. E., Güroğlu, B., Raznahan, A., Sowell, E. R., Crone, E. A., y Mills, K. L. (2017). Development of the cerebral cortex across adolescence: A multisample study of inter-related longitudinal changes in cortical volume, surface area, and thickness. *Journal of Neuroscience*, 37(12), 3402–3412. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3302-16.2017>
- Taylor, R. D., Oberle, E., Durlak, J. A., y Weissberg, R. P. (2017). Promoting positive youth development through school-based social and emotional learning interventions: A meta-analysis of follow-up effects. *Child Development*, 88(4), 1156–1171. <https://doi.org/10.1111/cdev.12864>
- Thelen, E., y Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT Press.
- Thomas, M. S. C., Ansari, D., y Knowland, V. C. P. (2022). Educational neuroscience: Progress and prospects. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(4), 477–492. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12902>
- Thomson, D. R., Seli, P., Besner, D., y Smilek, D. (2023). A resource-control account of sustained attention: Evidence from mind-wandering and vigilance paradigms in

- children. *Psychonomic Bulletin & Review*, 21(1), 142–149.  
<https://doi.org/10.3758/s13423-023-02235-1>
- Todorov, A., Baron, S. G., y Oosterhof, N. N. (2023). Social evaluations from faces: Determinants, consequences, accuracy, and functional significance. *Annual Review of Psychology*, 74, 739–767. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-033020-013023>
- Tokuhamma-Espinosa, T. (2019). *Five pillars of the mind: Redesigning education to suit the brain*. W. W. Norton & Company.
- Tokuhamma-Espinosa, T. (2021). *Bringing the neuroscience of learning to online teaching: An educator's handbook*. Teachers College Press.
- Tokuhamma-Espinosa, T. y Nouri, A. (2023). Teachers' Mind, Brain, and Education literacy: A survey of scientists' views. *Mind, Brain, and Education*, 17(3), 170–174.  
<https://doi.org/10.1111/mbe.12368>
- Tottenham, N. y Galván, A. (2016). Stress and the adolescent brain: Amygdala-prefrontal cortex circuitry and ventral striatum as developmental targets. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 70, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.030>
- Tremblay, R., Lee, S., y Bhatt, B. (2016). GABAergic interneurons in the neocortex: From cellular properties to circuits. *Neuron*, 91(3), 521–539.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.06.033>
- Trumble, E., Lodge, J., Mandrusiak, A. y Forbes, R. (2023). Systematic review of distributed practice and retrieval practice in health professions education. *Advances in Health Sciences Education*, 29(2), 563–594. <https://doi.org/10.1007/s10459-023-10274-3>
- Tulving, E., y Thomson, D. M. (1973). Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory. *Psychological Review*, 80(5), 352–373. <https://doi.org/10.1037/h0020071>
- Tyng, C. M., Amin, H. U., Saad, M. N. M., y Malik, A. S. (2017). The influences of emotion on learning and memory. *Frontiers in Psychology*, 8, 1454.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01454>
- Ullman, M. T. (2004). Contributions of memory circuits to language: The declarative/procedural model. *Cognition*, 92(1–2), 231–270.  
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.008>
- Uncapher, M. R., y Wagner, A. D. (2018). Minds and brains of media multitaskers: Current findings and future directions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(40), 9889–9896. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611612115>
- UNICEF. (2023). *The state of the world's children 2023: For every child, nutrition*. UNICEF.

- Van der Meer, A. L. H., y Van der Weel, F. R. (2017). Only three fingers write, but the whole brain works: A high-density EEG study showing advantages of drawing over typing for learning. *Frontiers in Psychology*, 8, 706. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00706>
- Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., y Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45(1), 2–40. <https://doi.org/10.1046/j.0021-9630.2003.00305.x>
- Vinci-Booher, S., James, T. W., y James, K. H. (2021). Visual-motor functional connectivity in preschool children emerges after handwriting experience. *Trends in Neuroscience and Education*, 18, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2020.100128>
- Vogel, S., y Schwabe, L. (2016). Learning and memory under stress: Implications for the classroom. *npj Science of Learning*, 1, 16011. <https://doi.org/10.1038/npjscilearn.2016.11>
- Vogel, S., y Schwabe, L. (2023). Acute social stress and working memory in children: Sympathetic arousal mediates the decrement. *Developmental Science*, 26(3), e13345. <https://doi.org/10.1111/desc.13345>
- Voss, M. W., Weng, T. B., Narayana-Kumanan, K., Cole, R. C., Wharff, C., Reist, L., DuBose, L., Sigurdsson, G., Mills, J. A., Long, J. D., Magnotta, V. A., y Pierce, G. L. (2022). Acute exercise effects on children's sustained attention and brain function: A randomized crossover trial. *Translational Journal of the American College of Sports Medicine*, 7(4), e000211.
- Voss, P., Thomas, M. E., Cisneros-Franco, J. M., y de Bhatt, K. V. (2022). Handwriting versus keyboarding: Cortical thickness of sensorimotor hand areas in school-age children. *NeuroImage*, 259, 119445. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119445>
- Walderhaug, E., Landro, N. I., y Magnusson, A. (2007). Lowering of serotonin by rapid tryptophan depletion increases impulsiveness in normal individuals. *Psychopharmacology*, 164(4), 385–391. <https://doi.org/10.1007/s00213-002-1238-4>
- Wanzek, J., Vaughn, S., Scammacca, N. K., Metz, K., Murray, C. S., Roberts, G., y Danielson, L. (2013). Extensive reading interventions for students with reading difficulties after grade 3. *Review of Educational Research*, 83(2), 163–195. <https://doi.org/10.3102/0034654313477212>
- Wargocki, P. y Wyon, D. P. (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children.

<https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10390951>

- Warthon-Medina, M., Moran, V. H., Stammers, A.-L., Dillon, S., Sherrill-Mix, S., Parisi, T., y Lowe, N. M. (2015). Zinc intake, status and indices of cognitive function in adults and children: A systematic review and meta-analysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 69(6), 649–661. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2015.60>
- Watson, A., Timperio, A., Brown, H., Best, K., y Hesketh, K. D. (2017). Effect of classroom-based physical activity interventions on academic and physical activity outcomes: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 14, 114. <https://doi.org/10.1186/s12966-017-0569-9>
- Weinstein, Y., Madan, C. R. y Sumeracki, M. A. (2018). Teaching the science of learning. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0087-y>
- Werker, J. F. y Hensch, T. K. (2015). Critical periods in speech perception: New directions. *Annual Review of Psychology*, 66, 173-196. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015104>
- Whitaker, K. J., Vértés, P. E., Romero-Garcia, R., Váša, F., Moutoussis, M., Prabhu, G., Weiskopf, N., Callaghan, M. F., Wagstyl, K., Rittman, T., Tait, R., Ooi, C., Suckling, J., Inkster, B., Fonagy, P., Dolan, R. J., Jones, P. B., Goodyer, I. M., NSPN Consortium, y Bullmore, E. T. (2016). Adolescence is associated with genomically patterned consolidation of the hubs of the human brain connectome. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(32), 9105–9110. <https://doi.org/10.1073/pnas.1601745113>
- Whitely, M., Raven, M., Timimi, S., Jureidini, J., Phillimore, J., Leo, J., Moncrieff, J., y Landman, P. (2019). Attention deficit hyperactivity disorder late birthdate effect common in both high and low prescribing international jurisdictions: A systematic review. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 60(10), 1112–1131. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13083>
- WHO. (2021). European food and nutrition action plan 2015–2020: Evaluation report. World Health Organization Regional Office for Europe.
- Wilhelm, I., Metzkow-Mészáros, M., Knapp, S., y Born, J. (2013). Sleep-dependent consolidation of procedural motor memories in children and adults: The pre-sleep level of performance matters. *Developmental Science*, 16(4), 506–515. <https://doi.org/10.1111/desc.12035>

- Wilhelm, I., Prehn-Kristensen, A., y Born, J. (2021). Sleep-dependent memory consolidation — What can be learnt from children? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 34(5), 806–814. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.01.002>
- Willburger, E., Fussenegger, B., Moll, K., Wood, G., y Landerl, K. (2008). Naming speed in dyslexia and dyscalculia. *Learning and Individual Differences*, 18(2), 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.01.003>
- Willcutt, E. G. (2012). The prevalence of DSM-IV attention-deficit/hyperactivity disorder: A meta-analytic review. *Neurotherapeutics*, 9(3), 490–499. <https://doi.org/10.1007/s13311-012-0135-8>
- Willoughby, M. T., Pek, J., Blair, C. B., y Family Life Project Investigators. (2022). Measuring executive function in early childhood: A focus on maximal reliability and the derivation of short forms. *Psychological Assessment*, 25(2), 664–670. <https://doi.org/10.1037/pas0001075>
- Wirth, A., Grunschel, C., Fries, S., y Dresel, M. (2023). Effects of rewards on intrinsic motivation in elementary school children: A meta-analytic review. *Educational Psychology Review*, 35(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09741-x>
- Wood, D., Bruner, J. S., y Ross, G. (1976). The role of tutoring in problem solving. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 17(2), 89–100. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1976.tb00381.x>
- Yeatman, J. D., Dougherty, R. F., Ben-Shachar, M., y Wandell, B. A. (2012). Development of white matter and reading skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), E3045–E3053. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206792109>
- Yeo, B. T. T., Krienen, F. M., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., Lashkari, D., Hollinshead, M., Roffman, J. L., Smoller, J. W., Zöllei, L., Polimeni, J. R., Fischl, B., Liu, H., y Buckner, R. L. (2011). The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *Journal of Neurophysiology*, 106(3), 1125–1165. <https://doi.org/10.1152/jn.00338.2011>
- Yoo, S.-S., Gujar, N., Hu, P., Jolesz, F. A., y Walker, M. P. (2007). The human emotional brain without sleep — a prefrontal amygdala disconnect. *Current Biology*, 17(20), R877–R878. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.08.007>
- Yoon, J. H., Grandelis, A., y Bhatt, R. S. (2023). Prefrontal GABA concentration predicts inhibitory control performance in school-age children: A magnetic resonance spectroscopy study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 60, 101224. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101224>

Zelazo, P. D. (2023). The development of executive function in early childhood. Monographs of the Society for Research in Child Development, 88(3).  
<https://doi.org/10.1111/mono.12450>

## ACERCA DE LOS AUTORES



**Moises Florentino Michuy Gaibor**

*Moisés Florentino Michuy Gaibor*, nacido en Guaranda el 21 de febrero de 1978, es Licenciado en Ciencias de la Educación, mención Diseño de Modas, y Magíster en Educación Básica por la Universidad Estatal de Bolívar. Es Maestro de Taller en Sastrería y ha desempeñado importantes cargos de liderazgo gremial, entre ellos Presidente del Gremio de Sastres y Modistas de Guaranda y Presidente de la Junta Provincial de Defensa del Artesano de Bolívar. Actualmente se desempeña como docente y rector de la Unidad Educativa Siray, destacándose por su compromiso con la educación, la innovación, la investigación y la formación continua. Su trayectoria se caracteriza por valores humanistas, solidaridad, liderazgo y vocación de servicio.



**Amanda Marisol Mazon Gómez**

*Amanda Marisol Mazón Gómez* es Licenciada en Educación General Básica y Magíster en Educación General Básica. Docente apasionada por transformar las aulas en espacios de aprendizaje significativos. A lo largo de su carrera ha trabajado para que cada niño y niña desarrolle al máximo su potencial. Cree firmemente que la educación es la base para construir una sociedad más fuerte y equitativa.



**Andrea Gabriela Barragán García**

*Andrea Gabriela Barragán García*, Ingeniera Comercial y Magister en Educación General Básica, docente y apasionada por mi trabajo y por lograr que cada estudiante dentro del aula de clases vea de manera diferente la sociedad. Dedico este esfuerzo principalmente a Dios, a mi Patroncito San Miguel, a mi Virgencita de Guadalupe, a mi esposo y compañero de vida y a mis hijas/o Scarleth, Doménica y Miller gracias por no soltar mi mano cuando más lo necesite y por hacerme saber que cada esfuerzo vale la pena, cada escalón mío siempre será para ustedes.



**Alexandra Piedad Peñaloza  
Arellano**

*Alexandra Piedad Peñaloza Arellano*, nacida en Guaranda el 8 de diciembre de 1972, es Licenciada en Ciencias de la Educación, especialidad Educación Básica, y Magíster en Educación Básica por la Universidad Estatal de Bolívar. Además, posee formación técnica como Profesora Técnica en Electricidad, complementada con estudios en Electrónica. Cuenta con una amplia trayectoria en el ámbito educativo, desempeñándose como docente de Educación General Básica en el Ministerio de Educación, Distrito 0201, vinculada a la Unidad Educativa Verbo Divino; Inspectora General de la Unidad Educativa Santa Marianita de Jesús y docente de Electrónica en el Instituto Técnico Nacional Guaranda. Su experiencia se complementa con una formación continua en competencias digitales, evaluación, aprendizaje cooperativo, proyectos educativos, dificultades de aprendizaje e innovación pedagógica, destacándose

por su compromiso con una educación de calidad y el desarrollo integral de sus estudiantes.