

Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA): propuesta con base neurobiológica para el diseño de microdesafíos cognitivos en educación superior

Adaptive NeuroPathway Model (NVA): A Neurobiologically-Based Proposal for Learning Design

Pantoja Silva, Verónica L. (1)

Pertenencia institucional

(1) Escuela de Educación |
Centro de Innovación
Educativa, Universidad
Mayor, Chile.

Correspondencia

veronicalps@gmail.com

ORCID

Pantoja Silva
0000-0001-5587-7094

Resumen

La educación superior se desarrolla hoy en un entorno marcado por la aceleración tecnológica, la presencia de inteligencia artificial y la alta demanda cognitiva, lo que exige estudiantes capaces de sostener una cognición flexible y adaptativa. No obstante, persisten prácticas docentes tradicionales que promueven aprendizajes repetitivos y poco desafiantes, limitando la reorganización sináptica y el desarrollo de habilidades cognitivas complejas. Este estudio teórico documental integra evidencia neurobiológica, cognitiva y neuroeducativa reciente (2019–2024) con el fin de proponer el Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA), orientado a potenciar el aprendizaje profundo en educación superior. A partir de un análisis de contenido inductivo y una búsqueda sistemática en Web of Science, se seleccionaron doce artículos que abordan plasticidad sináptica, procesamiento predictivo, reorganización cortical, carga cognitiva y prácticas pedagógicas basadas en neurociencia. Los resultados muestran que el aprendizaje profundo se activa cuando existen microdesafíos moderados, regulación equilibrada del esfuerzo mental, variabilidad contextual y un rol docente que modula atención, emoción y complejidad. El NVA articula cinco principios claves que permiten promover reorganización sináptica continua y flexibilidad cognitiva, ofreciendo un marco teórico actualizado y coherente con las demandas formativas del siglo XXI.

Palabras clave: Neuroeducación; Plasticidad sináptica; Aprendizaje profundo; Flexibilidad cognitiva

Abstract

Higher education is currently immersed in a technologically accelerated ecosystem characterized by artificial intelligence, intensive information flows and high cognitive demands, requiring flexible cognition and continuous adaptive learning. However, traditional teaching practices highly predictable and focused on content reproduction limit synaptic reorganization and the development of higher-order cognitive skills. This theoretical documentary study synthesizes recent neurobiological, cognitive and neuroeducational evidence (2019–2024) to propose the NeuroVía Adaptativa Model (NVA), a conceptual framework designed to promote deep learning in university students. Using an inductive content analysis approach and a systematic search in Web of Science, twelve articles were selected that address synaptic plasticity, predictive processing, cortical reorganization, cognitive load, and neuroeducation-informed teaching. The analysis reveals that deep learning emerges when students face moderated prediction errors, balanced cognitive load, contextual variability, and neuroinformed instructional regulation. The NVA articulates five key principles optimal microchallenge, cognitive load regulation, contextual diversification, neuroinformed scaffolding, and transfer-oriented evaluation offering a coherent theoretical basis for guiding pedagogical practices aligned with contemporary cognitive demands. The study concludes that activating continuous synaptic reorganization requires instructional designs that intentionally modulate effort, variability, and prediction error, positioning the teacher as a key regulator of cognitive and emotional engagement in higher education.

Key words: Neuroeducation; Synaptic plasticity; Deep learning; Flexible cognition

Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA): propuesta con base neurobiológica para el diseño de microdesafíos cognitivos en educación superior

Pantoja Silva Verónica L.

Magíster en Neurociencias de la Educación, Escuela de Educación, Universidad Mayor, Chile.

Centro de Innovación Educativa, Universidad Mayor, Chile

Abstract

Higher education is currently immersed in a technologically accelerated ecosystem characterized by artificial intelligence, intensive information flows and high cognitive demands, requiring flexible cognition and continuous adaptive learning. However, traditional teaching practices highly predictable and focused on content reproduction limit synaptic reorganization and the development of higher-order cognitive skills. This theoretical documentary study synthesizes recent neurobiological, cognitive and neuroeducational evidence (2019–2024) to propose the NeuroVía Adaptativa Model (NVA), a conceptual framework designed to promote deep learning in university students. Using an inductive content analysis approach and a systematic search in Web of Science, twelve articles were selected that address synaptic plasticity, predictive processing, cortical reorganization, cognitive load, and neuroeducation-informed teaching. The analysis reveals that deep learning emerges when students face moderated prediction errors, balanced cognitive load, contextual variability, and neuroinformed instructional regulation. The NVA articulates five key principles optimal microchallenge, cognitive load regulation, contextual diversification, neuroinformed scaffolding, and transfer-oriented evaluation offering a coherent theoretical basis for guiding pedagogical practices aligned with contemporary cognitive demands. The study concludes that activating continuous synaptic reorganization requires instructional designs that intentionally modulate effort, variability, and prediction error, positioning the teacher as a key regulator of cognitive and emotional engagement in higher education.

Keywords: Neuroeducation; Synaptic plasticity; Deep learning; Flexible cognition

Resumen

La educación superior se desarrolla hoy en un entorno marcado por la aceleración tecnológica, la presencia de inteligencia artificial y la alta demanda cognitiva, lo que exige estudiantes capaces de sostener una cognición flexible y adaptativa. No obstante, persisten prácticas docentes tradicionales que promueven aprendizajes repetitivos y poco desafiantes, limitando la reorganización sináptica y el desarrollo de habilidades cognitivas complejas. Este estudio teórico documental integra evidencia neurobiológica, cognitiva y neuroeducativa reciente (2019–2024) con el fin de proponer el Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA), orientado a potenciar el aprendizaje profundo en educación superior. A partir de un análisis de contenido inductivo y una búsqueda sistemática en Web of Science, se seleccionaron doce artículos que abordan plasticidad sináptica, procesamiento predictivo, reorganización cortical, carga cognitiva y prácticas pedagógicas basadas en neurociencia. Los resultados muestran que el aprendizaje profundo se activa cuando existen microdesafíos moderados, regulación equilibrada del esfuerzo mental, variabilidad contextual y un rol docente que modula atención, emoción y complejidad. El NVA articula cinco principios claves que permiten promover reorganización sináptica continua y flexibilidad cognitiva, ofreciendo un marco teórico actualizado y coherente con las demandas formativas del siglo XXI.

Palabras clave: Neuroeducación; Plasticidad sináptica; Aprendizaje profundo; Flexibilidad cognitiva.

Introducción

La educación superior contemporánea se desenvuelve en un contexto caracterizado por una acelerada transformación tecnológica, donde la presencia de inteligencia artificial, flujos continuos de información y entornos altamente estimulantes exige que los estudiantes desarrollen una cognición flexible, capaz de adaptarse a escenarios nuevos, ambiguos y cambiantes. En este ecosistema, la habilidad para actualizar estrategias cognitivas, reorganizar conocimientos y responder de manera creativa frente a demandas emergentes se vuelve un requisito fundamental para la formación universitaria. Tal como señalan Baker et al. (2025), los entornos actuales marcados por alta complejidad y múltiples fuentes de estímulo requieren capacidades de aprendizaje basadas en plasticidad, adaptabilidad y regulación ejecutiva, elementos esenciales para enfrentar los desafíos académicos y profesionales del siglo XXI. En este contexto, la creciente presencia de sistemas de inteligencia artificial ha comenzado a revalorizar las clases presenciales y sincrónicas, pues es en la interacción humana, en el diálogo guiado y en la resolución colectiva de problemas donde ocurre el aprendizaje genuino y el cambio cognitivo profundo, procesos que requieren co-construcción, regulación emocional y esfuerzo mental en tiempo real, y que difícilmente pueden ser sustituidos o automatizados por herramientas digitales.

Sin embargo, buena parte de la educación superior continúa organizándose en torno a prácticas altamente estructuradas y predecibles, donde predominan clases expositivas y evaluaciones centradas en la reproducción de contenidos. Desde una perspectiva neurocientífica, ello implica un riesgo: el cerebro tenderá a resolver tareas reutilizando sus rutas sinápticas conocidas, evitando el costo metabólico asociado a crear nuevas conexiones (Li & van Rossum, 2020). Por otra parte, cuando las demandas son excesivas o mal diseñadas, se incrementa la sobrecarga cognitiva (Sweller et al., 2019) y el estrés académico desadaptativo, con impacto negativo en funciones ejecutivas y bienestar (Villegas-Pérez, 2019). A esto se suma que los entornos educativos actuales presentan una diversidad creciente en términos de perfiles cognitivos, trayectorias formativas y necesidades emocionales, lo que exige reformular continuamente los modelos pedagógicos tradicionales. Frente a estas nuevas realidades, se hace imprescindible desarrollar enfoques que integren neurociencia, diseño instruccional y comprensión de la diversidad, generando propuestas innovadoras capaces de responder a contextos heterogéneos y a las demandas cognitivas del siglo XXI.

Antecedentes Teóricos.

La sinapsis es el punto especializado de comunicación entre neuronas donde se transmite y modula la información a través de procesos electroquímicos altamente regulados. Según Purves et al. (2021), las sinapsis constituyen las “unidades operativas esenciales del sistema nervioso”, responsables no solo de la transmisión de señales sino también de la adaptación y almacenamiento de información mediante cambios en la eficacia sináptica. La naturaleza dinámica de la sinapsis particularmente la remodelación de

espinas dendríticas permite que los circuitos neuronales se modifiquen en función de la experiencia, constituyendo la base estructural del aprendizaje.

Holtmaat y Svoboda (2009) demostraron que la formación, estabilización y eliminación de espinas dendríticas reflejan la integración de nuevas experiencias, mientras que Berry y Nedivi (2017) destacan que estos procesos de plasticidad estructural sustentan la capacidad del cerebro para reorganizar redes según la demanda cognitiva. Más recientemente, Miconi y Kay (2025) han evidenciado que la reorganización sináptica puede ocurrir de manera rápida cuando las tareas inducen discrepancias suficientemente significativas, reforzando la importancia de experiencias desafiantes para la formación de nuevas vías neuronales. El aprendizaje implica la modificación de la fuerza sináptica a través de procesos como la potenciación a largo plazo (LTP) y la depresión a largo plazo (LTD), junto con reestructuración de espinas dendríticas y ajustes en la expresión de receptores (Chen et al., 2022). Estos procesos dependen de una intensa actividad mitocondrial, recambio proteico, síntesis local de proteínas y reorganización del citoesqueleto, lo que los convierte en eventos de alto costo energético. Evidencia reciente muestra que la plasticidad sostenida constituye uno de los procesos metabólicamente más exigentes del cerebro (Karbowski, 2019).

Debido a estas demandas, los sistemas neuronales emplean mecanismos que optimicen cuándo y dónde expresar plasticidad. Li y van Rossum (2020) describen el mecanismo de synaptic caching, donde las neuronas utilizan formas transitorias de plasticidad antes de consolidar cambios permanentes, reduciendo el gasto energético global. Del mismo modo, trabajos de Pache (2023) y de van Rossum & Pache (2024) demuestran que las reglas de plasticidad competitiva, donde solo una parte de las sinapsis se modifican de manera estable, permiten conservar energía sin perjudicar la capacidad de aprendizaje.

Aunque las rutas sinápticas consolidadas garantizan eficiencia y rapidez, depender únicamente de ellas limita la flexibilidad cognitiva, la adaptación a entornos cambiantes y la capacidad de transferir conocimientos a situaciones nuevas. La neurociencia ha demostrado que la adquisición de habilidades complejas y la resolución de problemas no rutinarios requieren explorar nuevas configuraciones sinápticas y generar circuitos novedosos que permitan representar y procesar información de formas distintas (Shenhav et al., 2021).

Un nuevo circuito involucra que:

- Las nuevas redes permiten actualizar modelos internos del mundo, fundamentales para el pensamiento crítico y la toma de decisiones.
- Favorecen la integración entre redes ejecutivas, atencionales y de control cognitivo, lo que mejora la flexibilidad y la resolución estratégica de problemas (Marek et al., 2022).
- Incrementan la capacidad del cerebro para manejar incertidumbre y ambigüedad, elementos centrales de los entornos universitarios y laborales contemporáneos.

Teoría de la carga cognitiva y arquitectura del aprendizaje

La teoría de carga cognitiva (TCG) muestra que el aprendizaje se optimiza cuando el diseño instruccional regula adecuadamente la carga intrínseca del contenido, reduce la carga extrínseca irrelevante y potencia la carga germana (esfuerzo útil para aprender) destinada a la construcción y reorganización de esquemas cognitivos (Sweller et al., 2019; Hilliger, et al., 2023). En educación superior, esta gestión del esfuerzo mental es especialmente crítica: tareas demasiado fáciles limitan la activación de la plasticidad, mientras que demandas excesivas o mal estructuradas pueden generar bloqueo cognitivo, estrés desadaptativo y disminución en el rendimiento académico. Frente a la complejidad creciente de los entornos educativos actuales, se hace necesario diseñar nuevos modelos pedagógicos que consideren explícitamente estos principios, permitiendo calibrar el nivel de desafío, promover un procesamiento profundo y favorecer la adaptación cognitiva en estudiantes con perfiles diversos. Procesamiento predictivo y actualización de modelos internos.

El enfoque del procesamiento predictivo sostiene que el cerebro opera como un sistema inferencial que genera predicciones sobre el entorno y compara constantemente estas expectativas con la información sensorial entrante, minimizando el error de predicción mediante mecanismos jerárquicos de actualización (Clark, 2013; Sprevak & Smith, 2023). Desde la neurobiología, este proceso depende de la interacción entre redes corticales y subcorticales incluyendo corteza prefrontal, parietal y estructuras del sistema modulador dopaminérgico que ajustan la precisión de las señales sensoriales y modulan la plasticidad sináptica necesaria para actualizar los modelos internos (Friston et al., 2021; Heilbron & Meyniel, 2019).

Procesamiento predictivo y actualización de modelos internos

El enfoque del procesamiento predictivo sostiene que el cerebro opera como un sistema inferencial que genera predicciones sobre el entorno y compara constantemente estas expectativas con la información sensorial entrante, minimizando el error de predicción mediante mecanismos jerárquicos de actualización (Clark, 2013; Sprevak & Smith, 2023). Desde la neurobiología, este proceso depende de la interacción entre redes corticales y subcorticales incluyendo corteza prefrontal, parietal y estructuras del sistema modulador dopaminérgico que ajustan la precisión de las señales sensoriales y modulan la plasticidad sináptica necesaria para actualizar los modelos internos (Friston et al., 2021; Heilbron & Meyniel, 2019).

Cuando las tareas educativas son altamente repetitivas y estructuralmente similares, el sistema predictivo reduce progresivamente el error, provocando que el cerebro funcione en modo automático, con una baja necesidad de reorganización neuronal. En estas condiciones, la actividad se apoya principalmente en rutas sinápticas ya consolidadas, reduciendo la implicación de redes frontoparietales asociadas a flexibilidad cognitiva. Este fenómeno está ampliamente documentado en la literatura sobre procesamiento predictivo, que señala que la repetición estable disminuye el prediction error y favorece el uso de modelos internos rígidos (Heilbron & Meyniel, 2019), mientras que tareas con baja variabilidad demandan menos actualización sináptica y menor reclutamiento de regiones ejecutivas (Friston et al., 2021; Sprevak & Smith, 2023). Investigaciones recientes también han mostrado que cuando el entorno es altamente predecible, el sistema nervioso optimiza energía reutilizando patrones previos en lugar de generar nuevas rutas, limitando así la plasticidad adaptativa (Karbowski, 2019).

En cambio, la introducción de perturbaciones controladas como variaciones en el contexto, modificaciones en las condiciones del problema, cambios en los datos disponibles o en el formato de la tarea, incrementa el error de predicción y obliga al cerebro a revisar sus modelos internos. Este incremento de incertidumbre genera una activación selectiva de circuitos implicados en plasticidad dependiente de dopamina, facilitando procesos de reorganización sináptica, actualización conceptual y aprendizaje adaptativo (Stachenfeld et al., 2020; Parr et al., 2022).

Por lo que el objetivo general propuesto es proponer un modelo teórico neurobiológico cognitivo y educativa que articule los principios necesarios para promover reorganización sináptica continua, calibración de la carga cognitiva y regulación docente del esfuerzo, con el fin de orientar prácticas de enseñanza que potencien el aprendizaje profundo y flexible en educación superior.

Metodología

Este estudio adoptó un diseño cualitativo–documental sustentado en un análisis de contenido inductivo, orientado a integrar y sintetizar evidencia neurobiológica, cognitiva y educativa procedente de literatura especializada, con el fin de construir una propuesta teórico-conceptual sobre aprendizaje profundo en educación superior. Este enfoque se fundamenta en la utilidad del análisis de contenido para identificar categorías, patrones y relaciones emergentes a partir de textos científicos (Kriger, 2021; Mayring, 2015) y en la pertinencia de las revisiones conceptuales para generar nuevos modelos teóricos en campos interdisciplinarios como la neuroeducación (Snyder, 2019). La aproximación permitió identificar patrones conceptuales, mecanismos y conexiones teóricas a partir de estudios revisados críticamente, asegurando coherencia y pertinencia mediante un proceso sistemático de búsqueda, cribado y evaluación rigurosa de los artículos seleccionados, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Booth, Sutton y Papaioannou (2016) y los criterios de calidad sugeridos para revisiones teóricas por Torracó (2016).

Estrategia de búsqueda y criterios

Para garantizar rigor, pertinencia conceptual y coherencia teórica, se desarrolló un proceso de búsqueda y selección documental exclusivamente en Web of Science (WoS), abarcando publicaciones entre 2019 y 2024. Este proceso se sustentó en recomendaciones metodológicas para revisiones analíticas y análisis de contenido conceptual (Booth, Sutton & Papaioannou, 2016; Gough, Oliver & Thomas, 2017; Snyder, 2019), y se organizó en torno a tres conceptos orientadores: pertinencia conceptual (vinculación directa entre los textos recuperados y los procesos neurobiológicos, cognitivos y educativos); coherencia teórica (capacidad de los documentos para contribuir a un marco conceptual articulado); y rigor neuroeducativo (fundamentos empíricos o teóricos vinculados al aprendizaje humano). Bajo estos principios se articularon las búsquedas, filtros, criterios y etapas del proceso.

Dado que la búsqueda documental se realizó exclusivamente en Web of Science (WoS), fue necesario aplicar los filtros propios que ofrece esta plataforma para asegurar que el material recuperado cumpliera con criterios de actualidad, calidad y pertinencia conceptual. En este estudio se aplicaron los siguientes filtros: publicaciones dentro del periodo 2020–2024; categorías WoS relacionadas con *Neurosciences*, *Education & Educational Research*, *Cognitive Science*, *Behavioral Sciences* y *Psychology*; documentos del tipo *Article*, *Review Article*, *Book Chapter*; idioma inglés o español; y pertenencia exclusiva a WoS Core Collection.

Tras la aplicación de los filtros propios de Web of Science (WoS), la búsqueda se llevó a cabo mediante el uso de descriptores controlados y operadores booleanos (AND, OR, NOT), lo que permitió una recuperación precisa y exhaustiva de literatura pertinente. Esta estrategia se estructuró a partir de dominios conceptuales claramente delimitados, incluyendo neurobiología del aprendizaje, ciencias cognitivas, carga cognitiva, neuroeducación y educación superior, asegurando así que los documentos seleccionados respondieran directamente a los ejes temáticos del estudio.

Combinaciones booleanas utilizadas:

1. “synaptic plasticity” AND “learning” AND (“neural networks” OR “cortical connectivity”)
2. “predictive processing” AND “higher education” AND (“cognitive adaptation” OR “flexibility”)
3. “cognitive load theory” AND “university students” AND (“instructional design” OR “learning performance”)
4. “dopaminergic modulation” AND “learning effort” AND (“predictive coding” OR “reward processing”)
5. “neuroeducation” AND “instructional design” AND (“teaching practices” OR “scaffolding”)
6. “executive functions” AND “adaptive learning” AND (“working memory” OR “inhibitory control”)
7. “learning transfer” AND “cortical reorganization” AND (“plasticity” OR “long-term learning”)
8. “metabolic cost” AND “education” AND (“neural networks” OR “synaptic changes”)
9. “synaptic plasticity” AND “learning” AND “cortical reorganization” 7 Y QUEDARON
10. “cognitive load” AND “higher education” AND (“complex tasks” OR “mental effort”) 7 y quedaron
11. “synaptic plasticity” AND “learning”
12. “neuroeducation” AND (“learning transfer” OR “context variability”) NOT “clinical disorders”
13. “synaptic plasticity” AND “learning” AND (“neural networks” OR “cortical connectivity”)
14. “predictive processing” AND “higher education” AND (“cognitive adaptation” OR “flexibility”)
15. “cognitive load theory” AND “university students” AND (“instructional design” OR “learning performance”)

16. "dopaminergic modulation" AND "learning effort" AND ("predictive coding" OR "reward processing")
17. "neuroeducation" AND "instructional design" AND ("teaching practices" OR "scaffolding")
18. "executive functions" AND "adaptive learning" AND ("working memory" OR "inhibitory control")
19. "learning transfer" AND "cortical reorganization" AND ("plasticity" OR "long-term learning")
20. "metabolic cost" AND "education" AND ("neural networks" OR "synaptic changes")
21. "cognitive load" AND "higher education" AND ("complex tasks" OR "mental effort")
22. "neuroeducation" AND "teacher role" AND ("instructional regulation" OR "cognitive scaffolding")

Para garantizar la pertinencia conceptual y la coherencia teórica del material seleccionado, se establecieron criterios explícitos de inclusión y exclusión aplicados durante las etapas de cribado y lectura completa de los artículos, tabla 1.

Tabla1

Criterios explícitos de inclusión y exclusión para el cribado.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
<ul style="list-style-type: none"> • Artículos que abordan procesos neurobiológicos vinculados al aprendizaje. • Estudios sobre procesos cognitivos de orden superior (funciones ejecutivas, carga cognitiva, procesamiento predictivo). • Publicaciones relacionadas con educación universitaria o técnica. • Artículos que analizan prácticas pedagógicas basadas en evidencia neurocientífica. • Documentos que aportan a la comprensión de plasticidad, reorganización sináptica o esfuerzo cognitivo. • Estudios que conectan neurobiología y educación en contextos formativos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios centrados en patologías neurológicas (epilepsia, Parkinson, Alzheimer, etc.) • Investigaciones experimentales en animales • Investigaciones sobre alteraciones metabólicas o neurológicas sin relación con aprendizaje. • Estudios enfocados en poblaciones clínicas sin extrapolación educativa. • Investigaciones sobre procesos cognitivos en adultos mayores no vinculados a educación. • Artículos sin relación con neurobiología del aprendizaje, cognición o neuroeducación. • Contenidos puramente descriptivos o sin base neurobiológica/cognitiva aplicable.

Elaboración propia, 2025

Proceso de selección

La selección de los artículos se realizó mediante un proceso de cribado secuencial fundamentado en recomendaciones metodológicas ampliamente reconocidas (Booth, Sutton & Papaioannou, 2016; Gough, Oliver & Thomas, 2017; Bardin, 2011). Tras la lectura inicial por título, los documentos potencialmente pertinentes fueron incorporados a Mendeley, que se utilizó como herramienta de gestión bibliográfica, permitiendo organizar los textos por categorías temáticas, almacenar metadatos, facilitar la clasificación preliminar y realizar la eliminación automática de artículos duplicados originados por las distintas combinaciones de búsqueda. Esta depuración inicial permitió continuar el proceso con un conjunto de referencias no redundantes y adecuadamente estructuradas. Posteriormente, la lectura del resumen permitió evaluar la pertinencia conceptual preliminar del texto, identificando si abordaba procesos neurobiológicos del aprendizaje, funciones cognitivas relevantes o prácticas pedagógicas basadas en evidencia. Finalmente, durante la lectura completa, además de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se evaluó la rigurosidad del artículo considerando la claridad del diseño, la coherencia argumentativa, la explicitación de los fundamentos teóricos y la

solidez de las relaciones conceptuales, siguiendo las recomendaciones de evaluación crítica propuestas por Torracó (2016). Este procedimiento permitió asegurar que cada documento seleccionado final ofreciera aportes sustantivos y consistentes al análisis neurobiológico, cognitivo y educativo desarrollado en el estudio.

Resultados

El proceso de recolección y selección se desarrolló de manera secuencial y rigurosa. Inicialmente, se realizaron 22 combinaciones de descriptores en Web of Science, obteniendo un total de 1.083 artículos. Tras la revisión por título, se seleccionaron 91 documentos, que fueron importados a Mendeley para la eliminación de duplicados, quedando 66 artículos únicos. Posteriormente, se efectuó un cribado, aplicando criterios de inclusión y exclusión en resumen y luego se aplicaron al realizar la lectura completa, se evaluó la coherencia teórica, rigor metodológico, pertinencia educativa y aportes específicos al modelo, obteniéndose un corpus definitivo de 12 artículos (Tabla 2), que constituyen la base teórico-conceptual para la formulación del Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA).

Tabla 2

Secuencia de cribado y selección de documentos para el análisis

Etapa del proceso	Descripción de la acción	Total de artículos
1. Búsqueda inicial en WoS	22 combinaciones de descriptores usando AND/OR/NOT en neurobiología, cognición y neuroeducación	1.083
2. Selección por título	Revisión de pertinencia temática; se excluyen estudios no relacionados con aprendizaje, neurobiología o educación superior	198
3. Eliminación de duplicados en Mendeley	Depuración automática y manual según título, DOI y autores	66
4. Cribado por resúmenes (abstract screening)	Aplicación de criterios de inclusión/exclusión conceptuales.	46
5. Lectura completa (full-text screening)	Evaluación de rigor metodológico, coherencia teórica, relevancia educativa, aporte al modelo y criterios de inclusión y exclusión	12
final incluido	Artículos que aportan directamente a la base neurobiológica, cognitiva y neuroeducativa del Modelo NVA	12

Elaboración propia, 2025

El proceso sistemático de búsqueda y selección permitió identificar doce artículos que constituyen la base científica central del presente estudio. Estos trabajos representan una articulación sólida entre investigaciones experimentales, revisiones teóricas y estudios aplicados en educación, abordando dimensiones clave como plasticidad sináptica, predicción neuronal, reorganización cortical, carga cognitiva, funciones ejecutivas y prácticas pedagógicas con fundamento neurocientífico. La selección final reúne investigaciones recientes (2021–2025) que aportan evidencia actualizada y directamente relevante para comprender cómo se reorganizan las redes neuronales durante el aprendizaje, cómo el cerebro responde a la variabilidad de tareas y cuáles son las implicancias de estos mecanismos para el diseño instruccional y el rol docente. La tabla 3 sintetiza los atributos principales de cada estudio, incluyendo año, autores, tipo de

investigación y palabras clave, permitiendo visualizar de forma clara la diversidad metodológica y la riqueza conceptual que sustentan la propuesta teórica desarrollada.

Tabla 3

Descripción de cada artículo seleccionado

Año	Título del artículo	Autores	Tipo de investigación	Conceptos relevantes
2023	Plasticidad sináptica adaptativa en el aprendizaje neuronal	Scott & Frank	Estudio teórico computacional con fundamento neurobiológico	plasticidad sináptica, aprendizaje adaptativo, codificación neuronal, formación de memoria
2021	Restricciones biológicas en los modelos cognitivos y neuronales	Pulvermüller et al.	Revisión teórica	restricciones biológicas, modelos cognitivos, neurobiología, aprendizaje
2023	Mecanismos de plasticidad predictiva en circuitos neuronales	Halvagal & Zenke	Investigación experimental y modelamiento	plasticidad predictiva, error de predicción, circuitos neuronales, aprendizaje
2025	Reorganización rápida de redes neuronales durante el aprendizaje	Miconi & Kay	Estudio teórico computacional	reorganización rápida, dinámica del aprendizaje, redes neuronales
2024	Mecanismos de aprendizaje rápido y lento en circuitos corticales	Liao & Losonczy	Revisión neurobiológica	aprendizaje rápido, aprendizaje lento, plasticidad cortical, circuitos cerebrales
2023	Coordinación temporal y codificación de memoria	Etter et al.	Investigación experimental	coordinación temporal, memoria, dinámica neuronal, sincronía sináptica
2024	La excitabilidad intrínseca como regulador del aprendizaje	Hansel & Yuste	Revisión neurofisiológica	excitabilidad intrínseca, aprendizaje, plasticidad neuronal, regulación
2021	Carga cognitiva instruccional: implicaciones para el diseño del aprendizaje	Castro-Alonso et al.	Revisión teórica en educación	carga cognitiva, diseño instruccional, educación superior, aprendizaje
2022	El aprendizaje como un proceso del cerebro completo	Shin, Lee & Bong	Revisión teórica	aprendizaje integral, cerebro completo, procesos cognitivos
2024	Neuroeducación y dinámica neuronal del aprendizaje	Pradeep et al.	Artículo teórico neuroeducativo	neuroeducación, dinámica neuronal, enseñanza, aprendizaje
2022	Neurodidáctica en educación superior	Rodríguez et al.	Investigación aplicada en educación	neurodidáctica, educación superior, estrategias pedagógicas, aprendizaje cognitivo
2022	Neuroeducación aplicada a la formación docente	Procopio et al.	Investigación educativa aplicada	neuroeducación, formación docente, prácticas pedagógicas, desarrollo cognitivo

Elaboración propia, 2025

Los 12 artículos indican que, desde la neurobiología, se sabe que la plasticidad sináptica implica un costo metabólico elevado, Scott & Frank (2023) han demostrado que la plasticidad sináptica constituye un motor primario del aprendizaje, reconfigurando las interacciones neuronales según la experiencia, pero que dicha reorganización no ocurre si la tarea no representa un desafío relevante.

Pulvermüller et al. (2021) añaden que la reorganización cerebral se encuentra restringida por limitaciones biológicas y energéticas, lo que implica que no cualquier cambio sináptico es viable.

Halvagal & Zenke (2023), muestran que la plasticidad predictiva permite que el cerebro actualice representaciones mediante discrepancias moderadas entre expectativa y estímulo. Miconi & Kay (2025) describen mecanismos de reorganización rápida que permiten reajustar relaciones previas sin rehacer todo el aprendizaje, siempre que existan variaciones estructurales en la tarea.

A nivel de consolidación, Etter et al. (2023) demuestran que la coordinación temporal hipocampal es esencial para vincular experiencias, reforzar memoria y estabilizar circuitos. Hansel & Yuste (2024) aportan que la excitabilidad intrínseca es un mecanismo central para la formación de ensembles neuronales, reforzando la necesidad de experiencias recurrentes, variadas y secuencialmente optimizadas. Castro-Alonso et al. (2021) subrayan que la información mal diseñada consume recursos ejecutivos que deberían destinarse a la construcción de esquemas, limitando la plasticidad germana.

Pradeep et al. (2024) destacan que integrar principios neurobiológicos en la enseñanza mejora la modulación de atención, emoción y motivación.

La información recopilada muestra de manera consistente que:

1. El cerebro tiende a utilizar rutas eficientes si no se le exige reorganización.
2. La plasticidad se activa con desafíos moderados, variabilidad contextual y error de predicción.
3. La consolidación requiere repetición variada, coordinación temporal y excitabilidad sostenida.
4. La carga cognitiva regula si el esfuerzo se convierte en aprendizaje profundo o en bloqueo.
5. La formación docente en neuroeducación es clave para diseñar experiencias que movilizan estas dinámicas.

Discusión

La evidencia revisada muestra que los procesos de aprendizaje en educación superior dependen estrechamente de las dinámicas de plasticidad sináptica y reorganización neuronal que se activan cuando el estudiante enfrenta desafíos novedosos y cognitivamente significativos. Estudios como los de Scott & Frank (2023), Halvagal & Zenke (2023) y Etter et al. (2023) evidencian que la modificación de espinas dendríticas, la sincronía temporal y los ajustes predictivos ocurren de forma más robusta cuando el entorno demanda actualización continua de estrategias, en contraste con tareas altamente repetitivas que refuerzan automatismos. Del mismo modo, la distinción entre aprendizajes rápidos y lentos planteada por Liao & Losonczy (2024) sugiere que la educación universitaria debe alternar ciclos de exploración, consolidación y variación

contextual para sostener cambios neurales duraderos. Esta comprensión neurobiológica cuestiona la persistencia de prácticas pedagógicas excesivamente estructuradas, que no generan suficiente discrepancia entre expectativa y experiencia como para activar mecanismos de reorganización eficiente.

Paralelamente, investigaciones provenientes de la neurociencia cognitiva y la teoría del procesamiento predictivo (Pulvermüller et al., 2021; Sprevak & Smith, 2023) refuerzan que el cerebro minimiza el error de predicción reutilizando modelos previos cuando las demandas son homogéneas o carentes de variabilidad. Bajo estas condiciones, se observa una menor participación de redes frontoparietales implicadas en flexibilidad cognitiva, inhibición y actualización ejecutiva. Estudios recientes como los de Miconi & Kay (2025) muestran que la reorganización rápida necesaria para el aprendizaje complejo se activa únicamente cuando la tarea presenta variabilidad y elementos inesperados que obligan al sistema a abandonar rutas automatizadas. Así, la literatura converge en que la variabilidad estructural y el microdesafío cognitivo son componentes esenciales para producir cambios sinápticos que respalden el aprendizaje profundo, especialmente en contextos educativos diversificados y altamente demandantes como los actuales.

Desde la perspectiva educativa, los aportes de Castro-Alonso et al. (2021) y de Shin, Lee & Bong (2022) señalan que el aprendizaje en educación superior requiere una gestión equilibrada de la carga cognitiva, donde la demanda intrínseca se distribuya de manera secuenciada, la carga extrínseca se reduzca mediante diseño instruccional claro y la carga germana se potencie mediante actividades que favorezcan reorganización conceptual y reflexión metacognitiva. Por su parte, Pradeep et al. (2024), Rodríguez et al. (2022) y Procopio et al. (2022) destacan el papel central del docente como regulador del esfuerzo mental y emocional, responsable de diseñar experiencias que integren variabilidad contextual, andamiajes temporales, retroalimentación estratégica y oportunidades de transferencia. Esta integración pedagógica resulta especialmente relevante considerando la creciente diversidad neurocognitiva en las aulas universitarias y la urgencia de promover habilidades como flexibilidad, adaptación y razonamiento crítico.

Conclusión

La convergencia entre los hallazgos neurobiológicos y los estudios educativos analizados permite fundamentar la necesidad de un modelo que articule plasticidad, predicción, carga cognitiva y regulación docente. En este estudio se propone el Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA), que integra estos elementos para ofrecer una ruta conceptual que oriente prácticas pedagógicas capaces de activar reorganización sináptica continua y aprendizaje flexible. La literatura revisada respalda que los procesos de aprendizaje profundo requieren microdesafíos moderados, variabilidad contextual, excitabilidad intrínseca sostenida y condiciones que promuevan error de predicción óptimo sin sobrecargar las funciones ejecutivas. En consecuencia, el NVA surge como una propuesta coherente con las demandas cognitivas del siglo XXI, respondiendo a la necesidad de modelos pedagógicos que superen el enfoque transmisivo y favorezcan

experiencias educativas orientadas al cambio cerebral, la transferencia y la adaptación en entornos complejos y dinámicos.

Propuesta del modelo neurovía adaptativa (NVA)

El Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA) es un marco neuroeducativo que propone diseñar experiencias de aprendizaje que generen nuevas vías neuronales mediante microdesafíos cognitivos controlados, andamiaje docente calibrado, variabilidad contextual y transferencia progresiva. Su propósito es promover reorganización sináptica continua, flexibilidad cognitiva y aprendizaje profundo en estudiantes de educación superior.

El modelo se basa en cinco pilares derivados de la evidencia revisada:

1. Plasticidad sináptica bajo restricciones energéticas (Li & van Rossum, 2020; Scott & Frank, 2023; Pulvermüller et al., 2021) El cerebro reorganiza sus redes solo cuando el entorno lo exige; sino, opera en rutas eficientes ya automatizadas.
2. Error de predicción como motor del aprendizaje (Halvagal & Zenke, 2023; Miconi & Kay, 2025; Parr et al., 2022). Los desafíos moderados inducen actualización de modelos internos y reensamblaje cognitivo.
3. Coordinación temporal y excitabilidad como requisitos de consolidación (Etter et al., 2023; Hansel & Yuste, 2024). Sin repetición distribuida, variabilidad y activación recurrente, no hay estabilidad en las nuevas vías.
4. Carga cognitiva como límite operativo del esfuerzo (Sweller et al., 2019; Castro-Alonso et al., 2021). El esfuerzo solo produce aprendizaje si la carga cognitiva está regulada.
5. Docente como regulador neuroinformado del desafío (Pradeep et al., 2024; Caballero-Cobos & Llorent, 2022; Peregrina Nievas et al., 2022). El aprendizaje profundo requiere una guía humana capaz de modular esfuerzo, emoción y complejidad.

En este modelo (NVA) el aprendizaje profundo no ocurre de manera lineal ni secuencial, sino como una dinámica continua en la que el cerebro alterna entre reconocimiento de patrones previos, enfrentamiento a discrepancias, reorganización estratégica y transferencia. En este marco se describe una serie de momentos funcionales interdependientes y modulables según el contexto que explican cómo las redes neuronales se activan, se perturban, se reconstruyen y finalmente se estabilizan para permitir la flexibilidad cognitiva. Estos momentos representan configuraciones cognitivas y neurofisiológicas que emergen cuando el estudiante transita desde la familiaridad hacia el desafío moderado, y desde la exploración guiada hacia la generalización adaptativa, integrando procesos de predicción, plasticidad sináptica, carga cognitiva regulada y andamiaje docente.

Momento 1. Activación de la vía conocida: Se presenta una tarea familiar que activa rutas ya consolidadas → modo eficiente.

Momento 2. Perturbación desafiante controlada: Se introduce variación que genera error de predicción moderado → reorganización inicial.

Momento 3. Construcción guiada de nuevas vías: Andamiajes graduados, cooperación, metacognición → exploración estratégica sin bloqueo.

Momento 4. Consolidación y transferencia adaptativa: Variabilidad temporal, contextos nuevos, tareas interdisciplinarias → estabilidad y flexibilidad.

El aprendizaje profundo se activa cuando el estudiante enfrenta discrepancias moderadas (Microdesafío óptimo) entre expectativa y estímulo. Estas pequeñas perturbaciones generan error de predicción, activan plasticidad sináptica y favorecen la exploración de nuevas vías neuronales, siempre que el desafío no exceda la capacidad ejecutiva (Halvagal & Zenke, 2023; Scott & Frank, 2023). Los microdesafíos permiten salir de rutas automáticas sin provocar bloqueo cognitivo.

La plasticidad solo ocurre cuando la demanda cognitiva está equilibrada. Una carga excesiva satura la memoria de trabajo, mientras que una demanda baja no activa reorganización neuronal. La regulación de la carga intrínseca, extrínseca y germana mediante diseño instruccional claro, secuenciado y visualmente optimizado permite que el esfuerzo se transforme en aprendizaje y no en fatiga (Sweller et al., 2019; Castro-Alonso et al., 2021).

La variación de contextos, formatos y escenarios fortalece la consolidación y generalización del aprendizaje. La exposición a casos variados, simulaciones, análisis críticos y problemas con diferente estructura aumenta la robustez de las redes neuronales y favorece la transferencia cercana y lejana (Shin, Lee & Bong, 2022). La diversidad evita la rigidez cognitiva y promueve flexibilidad.

En este modelo el docente actúa como modulador del esfuerzo cognitivo y emocional, proporcionando apoyos temporales que permiten sostener el aprendizaje sin sobrecarga. El acompañamiento graduado favorece la excitabilidad neuronal estable, la motivación dopaminérgica y la regulación atencional, esenciales para consolidar nuevas conexiones (Hansel & Yuste, 2024; Pradeep et al., 2024). El andamiaje se retira progresivamente para promover autonomía.

La evaluación debe medir la capacidad de aplicar y adaptar conocimientos en situaciones nuevas, no solo repetir información. Problemas no vistos, variaciones de datos y tareas interdisciplinarias estimulan reorganización sináptica, fortalecen la memoria y exigen flexibilidad cognitiva (Miconi & Kay, 2025; Castro-Alonso et al., 2021). Así, la consolidación se transforma en aprendizaje generalizable y auténtico.

El proceso de análisis permitió identificar una convergencia entre evidencia neurobiológica, principios cognitivos y demandas educativas actuales, revelando la necesidad de propuestas que superen los modelos tradicionales centrados en la transmisión de contenidos. La literatura revisada mostró de manera consistente que el aprendizaje profundo depende de la activación continua de rutas sinápticas mediante microdesafíos, de la calibración precisa de la carga cognitiva y de la intervención docente como modulador del esfuerzo. Asimismo, la evidencia sobre el costo metabólico de la plasticidad, el rol de la dopamina en el procesamiento del error y la contribución de la variabilidad contextual en la consolidación de redes neurales respaldó la articulación de los principios teóricos que sustentan la propuesta desarrollada. Así, la integración sistemática de patrones emergentes permitió construir una base conceptual sólida para orientar prácticas pedagógicas capaces de promover reorganización sináptica continua, flexibilidad cognitiva y transferencia del aprendizaje en estudiantes de educación superior.

La integración sistemática de la evidencia neurobiológica, cognitiva y neuroeducativa revisada permite concluir que el aprendizaje profundo en educación superior depende de la convergencia entre plasticidad sináptica, regulación ejecutiva, procesamiento predictivo, carga cognitiva equilibrada y variabilidad contextual en el diseño instruccional. Los estudios analizados muestran de manera consistente que la reorganización neuronal solo ocurre cuando el cerebro enfrenta discrepancias moderadas entre expectativa y estímulo, activando mecanismos de plasticidad adaptativa (Scott & Frank, 2023) y procesos de actualización predictiva dependientes del error de predicción (Halvagal & Zenke, 2023). Dado el alto costo metabólico asociado a los cambios sinápticos estables, el cerebro tiende a reutilizar rutas ya consolidadas cuando la tarea es predecible (Li & van Rossum, 2020; Pulvermüller et al., 2021), lo que explica por qué la docencia tradicional, centrada en repetición y homogeneidad, refuerza circuitos automatizados y limita la flexibilidad cognitiva.

Asimismo, la literatura contemporánea demuestra que el aprendizaje duradero requiere coordinación temporal precisa, activación rítmica de circuitos y condiciones que favorezcan la excitabilidad intrínseca (Etter et al., 2023; Hansel & Yuste, 2024), así como la interacción entre mecanismos de aprendizaje rápido y lento que permiten estabilizar o ajustar redes según la demanda (Liao & Losonczy, 2024). La variabilidad contextual, ya sea mediante cambios en la estructura de la tarea, el formato o el entorno, fortalece la generalización del aprendizaje (Karbowski, 2019) y activa múltiples sistemas cognitivos necesarios para la integración conceptual (Shin, Lee & Bong, 2022). Por otro lado, la regulación adecuada de la carga cognitiva especialmente crítica en aulas diversas permite que el esfuerzo mental se transforme en plasticidad germana y no en saturación ejecutiva (Sweller et al., 2019; Castro-Alonso et al., 2021). La neuroeducación aporta evidencia adicional sobre el papel del docente como modulador del esfuerzo, la atención y la emoción, mostrando que el acompañamiento informado neurocientíficamente mejora

la calidad del aprendizaje y la capacidad de transferencia (Pradeep et al., 2024; Rodríguez et al., 2022; Procopio et al., 2022).

A partir de esta síntesis teórica, se construyó el Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA) como una propuesta conceptual coherente con las dinámicas neurobiológicas del aprendizaje y con las necesidades cognitivas del siglo XXI. El modelo integra cinco principios fundamentales: microdesafío óptimo, regulación de la carga cognitiva, diversificación contextual, andamiaje neuroinformado y evaluación orientada a la transferencia, los cuales se sustentan en la evidencia revisada sobre reorganización sináptica, excitabilidad neuronal, procesamiento predictivo, consolidación distribuida y prácticas pedagógicas basadas en evidencia. En conjunto, el NVA da respuesta al objetivo general del estudio al ofrecer un marco teórico sólido, actual y neurobiológicamente fundamentado para orientar experiencias de aprendizaje profundo, flexible y adaptativo en educación superior.

Limitaciones

Aunque este estudio se desarrolló siguiendo un proceso riguroso de búsqueda, selección y análisis documental, es importante reconocer ciertas limitaciones asociadas a su alcance. En primer lugar, la revisión se realizó exclusivamente en Web of Science, una base de datos altamente consolidada y reconocida por su rigor, pero que podría dejar fuera trabajos pertinentes presentes en otras fuentes. No obstante, el uso de WoS asegura la inclusión de literatura con altos estándares de calidad, revisión por pares y relevancia internacional, por lo que esta decisión metodológica fortalece la validez teórica del análisis. En segundo lugar, debido a la naturaleza integrativa del estudio, se priorizó la síntesis conceptual por sobre la evaluación empírica; por ello, aunque el Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA) se basa en evidencia sólida, su aplicación práctica aún requiere estudios experimentales o de intervención en contextos educativos reales.

Proyecciones del estudio

Las proyecciones del Modelo NeuroVía Adaptativa (NVA) abren diversas líneas de investigación y aplicación. En primer lugar, se requiere avanzar hacia estudios empíricos cuantitativos, cualitativos o mixtos que permitan validar cada uno de los principios del modelo en contextos universitarios reales, evaluando su impacto en reorganización sináptica, esfuerzo cognitivo, desempeño académico y transferencia del aprendizaje. En segundo lugar, el NVA puede orientar el diseño de intervenciones pedagógicas basadas en microdesafíos, regulación de carga cognitiva y variabilidad contextual, generando evidencia aplicada en carreras de alta demanda cognitiva como salud, ingeniería y formación docente. Además, futuras investigaciones podrían adaptar el modelo a contextos de educación técnica y formación continua, explorando su pertinencia en poblaciones neurodiversas y estudiantes con distintas trayectorias educativas. También se abre la posibilidad de desarrollar instrumentos de evaluación del esfuerzo cognitivo y la flexibilidad adaptativa basados en los componentes del NVA.

Bibliografía

- Berry, K. P., & Nedivi, E. (2017). Spine dynamics: Are they all the same? *Neuron*, 96(1), 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.008>
- Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review* (2nd ed.). Sage.
- Castro-Alonso, J. C., Ayres, P., & Paas, F. (2021). Cognitive load theory and its application in STEM education. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77851-6>
- Chen, H., Liu, X., Li, Y., & Zhang, M. (2022). Structural dynamics of dendritic spines: Mechanisms underlying synaptic plasticity and learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 23(4), 251–266. <https://doi.org/10.1038/s41583-022-00542-3>
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477>
- Friston, K., FitzGerald, T., Parr, T., Price, C., & Holmes, E. (2021). Deep temporal models and active inference. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 128, 374–389. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.06.007>
- Gough, D., Oliver, S., & Thomas, J. (2017). *An introduction to systematic reviews* (2nd ed.). Sage.
- Heilbron, M., & Meyniel, F. (2019). Prediction error in the brain: Signal, noise, or computation? *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 29, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.04.011>
- Hilliger, I., Castro, M., Huerta, E., & Buzeta, S. (2023, diciembre 27). *Balancear la carga y la exigencia académica: Recomendaciones desde la perspectiva de estudiantes y docentes universitarios* (Policy Brief N.º 16). Núcleo Milenio Experiencia Estudiantil en Educación Superior (NMEdSup). <https://nmedsup.cl/wp-content/uploads/2023/12/Policy-Brief-16.pdf>
- Karbowski, J. (2019). *Journal of Neurophysiology*, 121(5), 1840–1857. <https://doi.org/10.1152/jn.00092.2019>
- Kruger, P. (2021). El análisis de contenido en textos normativos: propuestas prácticas en ciencias sociales. *Revista de investigación interdisciplinaria en métodos experimentales*, 1(10), 9–33.
- Li, Q., & van Rossum, M. C. W. (2020). Energy-efficient synaptic plasticity. *eLife*, 9, e50804. <https://doi.org/10.7554/eLife.50804>
- Marek, S., Tervo-Clemmens, B., Calabro, F. J., Montez, D., Kay, B., Hatoum, A. S., Donohue, M. R., Foran, W., Miller, R. L., Feczko, E., Miranda-Dominguez, O., Graham, A., Earl, E., Perrone, A., Cordova, M., Doyle, O., Markiewicz, C., Rudolph, M. D., Laumann, T. O., ... Dosenbach, N. (2022). Reproducible brain-

- wide association studies require thousands of individuals. *Nature*, 603(7902), 654–660. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04492-9>
- Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. (2022). *Active inference: The free energy principle in mind, brain, and behavior*. MIT Press.
- Pradeep, A., Singh, R., & Kumar, S. (2024). Neuroeducation and the dynamics of cognitive engagement in university learning. *Educational Neuroscience*, 9(1), 25–39. <https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1437418>
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W., & LaMantia, A. (2021). *Neuroscience* (7th ed.). Oxford University Press.
- Ríos, S., & Álvarez, M. (2023). Neurodidáctica y regulación del esfuerzo cognitivo en educación superior. *Revista Iberoamericana de Educación Superior*, 14(41), 210–230. <https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2023.41.1230>
- Shenhav, A., Musslick, S., Lieder, F., Kool, W., & Botvinick, M. (2021). Toward a rational and mechanistic account of mental effort. *Annual Review of Neuroscience*, 44, 107–127. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-092920-121259>
- Sprevak, M., & Smith, R. (2023). Predictive processing and mental representation. *Mind & Language*, 38(2), 285–309. <https://doi.org/10.1111/mila.12405>
- Stachenfeld, K., Botvinick, M., & Gershman, S. (2020). The hippocampus as a predictive map. *Nature Neuroscience*, 23(12), 1546–1556. <https://doi.org/10.1038/s41593-020-00721-z>
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2019). *Cognitive load theory* (2nd ed.). Springer.
- Villegas-Pérez, M. (2019). Estrés académico y funciones ejecutivas en estudiantes universitarios: Un análisis multidimensional. *Revista Colombiana de Psicología*, 28(2), 85–101. <https://doi.org/10.15446/rcp.v28n2.74866>