

NEUROPLASTICIDADE E DESENVOLVIMENTO CEREBRAL AO LONGO DO CICLO VITAL: MECANISMOS, JANELAS DE OPORTUNIDADE E FATORES MODULADORES

NEUROPLASTICITY AND BRAIN DEVELOPMENT ACROSS THE LIFE SPAN: MECHANISMS, WINDOWS OF OPPORTUNITY, AND MODULATING FACTORS

NEUROPLASTICIDAD Y DESARROLLO CEREBRAL A LO LARGO DEL CICLO VITAL: MECANISMOS, VENTANAS DE OPORTUNIDAD Y FACTORES MODULADORES

Suzi Maria Carvalho Mariño¹, Carina Santos Silveira², João Paulo Almeida Souza³, Joab da Silva Barbosa⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i92.6220

Recibido: 05/06/2026 | Aceptado: 26/06/2026 | Publicación en línea: 18/07/2026.

RESUMO

A neuroplasticidade constitui um dos principais mecanismos biológicos responsáveis pela capacidade do cérebro de adaptar-se às experiências, reorganizar circuitos neurais e modificar sua estrutura e funcionamento ao longo da vida. Considerando o desenvolvimento humano como um processo contínuo e dinâmico, que se estende do período pré-natal à velhice e envolve transformações biológicas, cognitivas, emocionais e sociais, este estudo teve como objetivo mapear as evidências científicas sobre neuroplasticidade e desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, com foco nos mecanismos biológicos, nas janelas de oportunidade e nos fatores moduladores da organização e reorganização neural. Para isso, realizou-se uma revisão de escopo da literatura, de abordagem qualitativa, nas bases Portal de Periódicos CAPES, PubMed e Scopus. Os resultados evidenciaram que o desenvolvimento cerebral decorre da interação entre fatores genéticos, moleculares, hormonais, ambientais e socioculturais. Destacaram-se a primeira infância e a adolescência como importantes janelas de oportunidade, marcadas por elevada plasticidade cerebral e maior sensibilidade às influências ambientais. Também foram identificados fatores protetivos, como nutrição, atividade física e cuidado responsivo, e fatores de vulnerabilidade, como estresse crônico, negligência e pobreza. Conclui-se que a neuroplasticidade desempenha papel central na construção das competências cognitivas, emocionais e sociais ao longo da vida.

Palavras-chave: Neuroplasticidade. Desenvolvimento cerebral. Neurodesenvolvimento. Ciclo

¹ Pós-doutora em Design, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: suzimarino@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8869-2299>

² Doutora em Artes Visuais, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, Bahia, Brasil. E-mail: csssilveira@ufba.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5266-1204>

³ Bacharel em Artes, Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) - Campus Sosígenes Costa, Porto Seguro, Bahia, Brasil. E-mail: jpauloa909@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4188-934X>

⁴ Graduado em Letras Vernáculas, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, Bahia, Brasil. E-mail: Joabsilvabarbosa@yahoo.com.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-3447-5524>

vital. Períodos sensíveis. Aprendizagem.

ABSTRACT

Neuroplasticity is one of the main biological mechanisms responsible for the brain's ability to adapt to experiences, reorganize neural circuits, and modify its structure and functioning throughout life. Considering human development as a continuous and dynamic process that extends from the prenatal period to old age and involves biological, cognitive, emotional, and social transformations, this study aimed to map the scientific evidence on neuroplasticity and brain development across the life span, focusing on the biological mechanisms, windows of opportunity, and factors that modulate neural organization and reorganization. To this end, a scoping review with a qualitative approach was conducted in the CAPES Journal Portal, PubMed, and Scopus databases. The results showed that brain development results from the interaction between genetic, molecular, hormonal, environmental, and sociocultural factors. Early childhood and adolescence stood out as important windows of opportunity, characterized by high brain plasticity and greater sensitivity to environmental influences. Protective factors, such as nutrition, physical activity, and responsive care, were also identified, as were vulnerability factors, such as chronic stress, neglect, and poverty. It is concluded that neuroplasticity plays a central role in the development of cognitive, emotional, and social competencies throughout life.

Keywords: Neuroplasticity. Brain development. Neurodevelopment. Life cycle. Sensitive periods. Learning.

RESUMEN

La neuroplasticidad constituye uno de los principales mecanismos biológicos responsables de la capacidad del cerebro para adaptarse a las experiencias, reorganizar los circuitos neuronales y modificar su estructura y funcionamiento a lo largo de la vida. Considerando el desarrollo humano como un proceso continuo y dinámico, que se extiende desde el periodo prenatal hasta la vejez e implica transformaciones biológicas, cognitivas, emocionales y sociales, el objetivo de este estudio fue recopilar la evidencia científica sobre la neuroplasticidad y el desarrollo cerebral a lo largo del ciclo vital, centrándose en los mecanismos biológicos, las ventanas de oportunidad y los factores que modulan la organización y la reorganización neuronal. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica de alcance amplio, con un enfoque cualitativo, en las bases de datos Portal de Periódicos CAPES, PubMed y Scopus. Los resultados pusieron de manifiesto que el desarrollo cerebral es fruto de la interacción entre factores genéticos, moleculares, hormonales, ambientales y socioculturales. Se destacaron la primera infancia y la adolescencia como importantes ventanas de oportunidad, caracterizadas por una elevada plasticidad cerebral y una mayor sensibilidad a las influencias ambientales. También se identificaron factores protectores, como la nutrición, la actividad física y el cuidado responsivo, y factores de vulnerabilidad, como el estrés crónico, el abandono y la pobreza. Se concluye que la neuroplasticidad desempeña un papel fundamental en el desarrollo de las competencias cognitivas, emocionales y sociales a lo largo de toda la vida.

Palabras clave: Neuroplasticidad. Desarrollo cerebral. Neurodesarrollo. ciclo vital. Periodos sensibles. Aprendizaje.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento cerebral humano constitui um processo dinâmico, contínuo e multifatorial, resultante da interação entre fatores genéticos, biológicos, ambientais, sociais e culturais que atuam desde o período pré-natal até a vida adulta. Ao longo das últimas décadas, os avanços das neurociências têm demonstrado que a formação e a organização do sistema nervoso não dependem exclusivamente da herança genética, mas também das experiências vivenciadas em diferentes momentos do desenvolvimento. Nessa perspectiva, o cérebro apresenta notável capacidade de adaptação às demandas internas e externas, modificando continuamente sua estrutura e seu funcionamento em resposta aos estímulos provenientes do ambiente (Lopes, 2020; Dow-Edwards et al., 2019).

Essa capacidade adaptativa é denominada neuroplasticidade e constitui um dos princípios primordiais do desenvolvimento cerebral. Por meio de mecanismos como neurogênese, sinaptogênese, poda sináptica, mielinização, remodelação dendrítica e reorganização funcional dos circuitos neurais, o cérebro é capaz de fortalecer, enfraquecer ou estabelecer novas conexões ao longo da vida, favorecendo processos relacionados à aprendizagem, memória, cognição, regulação emocional e adaptação comportamental (Selemon, 2013; Tau et al., 2010). Conforme destacam Nelson et al. (2019), as experiências ambientais exercem papel decisivo nesse processo, influenciando diretamente a formação e a reorganização das redes neurais responsáveis pelo desenvolvimento cognitivo, emocional e social.

Embora a plasticidade cerebral esteja presente durante toda a vida, determinadas fases do desenvolvimento caracterizam-se por maior sensibilidade às influências ambientais. Essas fases, frequentemente denominadas períodos sensíveis ou janelas de oportunidade, correspondem a momentos em que o cérebro apresenta elevada capacidade de reorganização e aprendizagem (Britto et al., 2017; Black et al., 2017). Entre essas etapas, destacam-se a primeira infância e a adolescência, períodos marcados por intensas transformações neurobiológicas e pela reorganização de circuitos relacionados às funções executivas, à cognição social, à aprendizagem e à regulação emocional (Modabbernia et al., 2021; Silvers, 2022).

Na primeira infância, ocorre intensa proliferação neuronal, formação acelerada de conexões sinápticas e progressiva mielinização dos circuitos cerebrais, tornando o cérebro

particularmente receptivo às experiências de cuidado, estimulação e interação social (Crespi et al., 2020; Britto et al., 2017). Nesse período, fatores como nutrição adequada, aleitamento materno, vínculos afetivos responsivos e ambientes enriquecidos favorecem trajetórias positivas de desenvolvimento, enquanto condições de negligência, pobreza, privação psicossocial e exposição ao estresse podem comprometer processos essenciais de organização neural (Cusick, 2016; Fernandes et al., 2019; Nelson et al., 2019).

De forma semelhante, a adolescência representa uma segunda grande janela de oportunidade para a reorganização cerebral. Durante essa fase, ocorrem processos de refinamento sináptico, mielinização e fortalecimento das conexões entre regiões corticais e subcorticais, particularmente entre o córtex pré-frontal e estruturas relacionadas ao processamento emocional e motivacional (Blakemore et al., 2006; Murty, Calabro et al., 2016; Juraska et al., 2017). Ao mesmo tempo em que essa elevada plasticidade favorece a consolidação de competências cognitivas e socioemocionais, também amplia a vulnerabilidade aos efeitos de experiências adversas, como estresse crônico, conflitos familiares, uso de substâncias psicoativas e exposição a ambientes ameaçadores (Dow-Edwards et al., 2019; Sicher et al., 2022; Thijssen et al., 2024).

Além das experiências ambientais, a literatura científica evidencia que diversos mecanismos biológicos participam da modulação da neuroplasticidade ao longo do ciclo vital. Fatores neurotróficos, neurotransmissores, hormônios, mecanismos epigenéticos e processos neuroimunes atuam de forma integrada na formação, manutenção e reorganização das conexões neurais (Dincheva et al., 2016; Murty et al., 2016; Crews et al., 2019; Sicher et al., 2022). Paralelamente, condições como nutrição adequada, atividade física regular, qualidade do sono e experiências positivas de cuidado contribuem para a manutenção da plasticidade cerebral e para a promoção do desenvolvimento saudável (Maski et al., 2013; Jing et al., 2024; Leisman et al., 2025).

Apesar da crescente produção científica sobre neuroplasticidade e desenvolvimento cerebral, os conhecimentos encontram-se dispersos entre diferentes áreas do saber, dificultando uma compreensão integrada dos mecanismos envolvidos, das fases de maior sensibilidade do desenvolvimento e dos fatores que favorecem ou comprometem a organização dos circuitos neurais. Essa fragmentação evidencia a necessidade de estudos que sistematizem as evidências disponíveis, permitindo compreender de forma mais abrangente como fatores biológicos, ambientais e psicossociais interagem na construção do cérebro humano ao longo da vida.

Diante desse cenário, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: como os mecanismos de neuroplasticidade, as janelas de oportunidade do desenvolvimento e os fatores biológicos, ambientais e psicossociais interagem para influenciar a organização, a reorganização e a adaptação do cérebro ao longo do ciclo vital?

A realização deste estudo justifica-se pela relevância científica e social do tema. Do ponto de vista científico, contribui para a integração dos conhecimentos produzidos nas áreas da neurociência do desenvolvimento, educação e saúde, ampliando a compreensão sobre os processos que regulam a plasticidade cerebral. Sob a perspectiva social, a identificação de fatores protetivos, fatores de vulnerabilidade e períodos de maior sensibilidade do desenvolvimento pode subsidiar ações voltadas à promoção da saúde, da aprendizagem e do desenvolvimento humano em diferentes contextos.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo mapear as evidências científicas sobre a neuroplasticidade e o desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, com foco nos mecanismos envolvidos, nas janelas de oportunidade do desenvolvimento e nos fatores que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais. Para alcançar esse propósito, busca identificar os principais mecanismos neurobiológicos associados à plasticidade cerebral, caracterizar os períodos sensíveis do desenvolvimento, analisar os fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais que influenciam a organização neural e sintetizar as evidências relacionadas aos fatores de proteção e vulnerabilidade que afetam o desenvolvimento cognitivo, emocional e social ao longo da vida.

PROBLEMA DE PESQUISA

Como os mecanismos de neuroplasticidade, as janelas de oportunidade do desenvolvimento e os fatores biológicos, ambientais e psicossociais interagem para influenciar a organização, a reorganização e a adaptação do cérebro ao longo do ciclo vital?

JUSTIFICATIVA

O crescente avanço das neurociências nas últimas décadas tem ampliado significativamente a compreensão sobre os mecanismos que regulam o desenvolvimento cerebral humano. Nesse contexto, a neuroplasticidade passou a ocupar posição central nas investigações

científicas, por evidenciar que o cérebro permanece capaz de reorganizar sua estrutura e seu funcionamento em resposta às experiências vivenciadas ao longo de todo o ciclo vital (Lopes, 2020; Dow-Edwards et al., 2019). Apesar desse avanço, os conhecimentos produzidos encontram-se dispersos em diferentes áreas do saber, como neurociência, psicologia, educação, saúde e ciências do comportamento, dificultando uma visão integrada dos processos envolvidos no desenvolvimento cerebral.

A relevância científica desta pesquisa está relacionada à necessidade de reunir, organizar e sintetizar as evidências disponíveis acerca dos mecanismos de neuroplasticidade, das janelas de oportunidade do desenvolvimento e dos fatores que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais. Embora existam numerosos estudos abordando aspectos específicos do neurodesenvolvimento, ainda são escassos os trabalhos que apresentam uma visão abrangente das interações entre fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais ao longo das diferentes fases do ciclo vital.

Adicionalmente, as evidências indicam que algumas fases do desenvolvimento, sobretudo a primeira infância e a adolescência, apresentam maior receptividade às influências do ambiente, configurando períodos especialmente relevantes para potencializar o desenvolvimento humano (Britto et al., 2017; Black et al., 2017; Modabbernia et al., 2021). Nesse contexto, fatores como alimentação adequada, prática regular de atividade física, sono de qualidade, relações afetivas sensíveis e contextos ambientalmente estimulantes têm sido relacionados a percursos mais positivos de maturação cerebral e de organização funcional do sistema nervoso (Cusick, 2016; Jing et al., 2024; Maski et al., 2013; Leisman et al., 2025). Em contrapartida, condições como estresse crônico, negligência, pobreza, privação psicossocial e exposição a ambientes adversos podem comprometer processos primordiais de organização neural e aumentar a vulnerabilidade a dificuldades cognitivas, emocionais e comportamentais (Fernandes et al., 2019; Nelson et al., 2019; Sicher et al., 2022).

Sob a perspectiva social, a compreensão desses mecanismos possui relevância para a formulação de estratégias de promoção da saúde, da aprendizagem e do desenvolvimento humano. O conhecimento sobre os fatores que favorecem ou comprometem a plasticidade cerebral pode subsidiar políticas públicas, programas educacionais, ações de prevenção e intervenções voltadas à infância, adolescência e demais etapas da vida. Além disso, contribui para orientar práticas de cuidado, educação e promoção da saúde fundamentadas em evidências científicas.

Dessa forma, justifica-se a realização desta revisão de escopo pela necessidade de sistematizar o conhecimento produzido sobre neuroplasticidade e desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, identificando mecanismos, períodos sensíveis, fatores de proteção e fatores de vulnerabilidade que influenciam a formação, a adaptação e a reorganização dos circuitos neurais, contribuindo para o avanço do conhecimento científico e para a compreensão dos processos que sustentam o desenvolvimento humano.

OBJETIVOS

Objetivo geral

Mapear as evidências científicas acerca da neuroplasticidade e do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, com foco nos mecanismos envolvidos, nas janelas de oportunidade do desenvolvimento e nos fatores que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais.

Objetivos específicos

- Realizar uma revisão de escopo da literatura sobre neuroplasticidade e desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital nas bases de dados Portal de Periódicos CAPES, PubMed e Scopus;
- Mapear os principais mecanismos neurobiológicos associados à neuroplasticidade durante o desenvolvimento humano;
- Identificar as principais janelas de oportunidade e períodos sensíveis do desenvolvimento cerebral descritos na literatura científica;
- Levantar os fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais relacionados à promoção ou à vulnerabilidade do desenvolvimento cerebral;
- Sintetizar as evidências sobre os efeitos de experiências positivas e adversas na organização e reorganização dos circuitos neurais;
- Analisar as implicações dos achados para a compreensão do desenvolvimento cognitivo, emocional e social ao longo do ciclo vital.

METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa teórica, de abordagem qualitativa, desenvolvida por meio de revisão de escopo da literatura, com o propósito de mapear, analisar, organizar e sintetizar as evidências científicas relacionadas à neuroplasticidade e ao desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, considerando os mecanismos biológicos envolvidos, as janelas de oportunidade do desenvolvimento e os fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais.

A revisão de escopo constitui uma abordagem metodológica destinada ao mapeamento amplo e sistematizado da produção científica disponível sobre determinado fenômeno, permitindo identificar conceitos centrais, tipos de evidência, lacunas do conhecimento, abordagens metodológicas e tendências investigativas. Diferentemente da revisão sistemática, sua finalidade não consiste em selecionar estudos exclusivamente com base no rigor metodológico ou estabelecer hierarquias de evidências, mas compreender a extensão, a natureza e as características da produção científica existente sobre um tema, favorecendo a síntese e a organização do conhecimento disponível (Barbosa Filho et al., 2019; Cordeiro et al., 2020; Peters et al., 2020).

A condução da revisão seguiu etapas metodológicas estruturadas, orientadas por critérios de transparência, organização analítica, rigor científico e reprodutibilidade. Inicialmente, procedeu-se à definição do problema de pesquisa, dos objetivos investigativos e da estratégia de busca, direcionada à compreensão de como os mecanismos de neuroplasticidade, as janelas de oportunidade do desenvolvimento e os fatores moduladores influenciam a organização, a reorganização e a adaptação do cérebro ao longo do ciclo vital.

Posteriormente, foi realizada a busca bibliográfica nas bases de dados Portal de Periódicos CAPES, PubMed e Scopus, selecionadas em razão de sua abrangência, relevância científica e potencial de integração interdisciplinar entre os campos da neurociência, psicologia do desenvolvimento, educação, saúde e comportamento humano.

O levantamento bibliográfico contemplou artigos científicos, revisões de literatura e publicações acadêmicas que abordassem a neuroplasticidade e o desenvolvimento cerebral em diferentes fases do ciclo vital, desde o período pré-natal até a idade adulta. Foram incluídos estudos disponíveis em português, inglês e espanhol, com acesso ao texto completo.

Como critérios de inclusão, foram selecionados estudos que abordassem explicitamente mecanismos neurobiológicos da plasticidade cerebral, processos de maturação e reorganização neural, períodos sensíveis do desenvolvimento, fatores ambientais moduladores do neurodesenvolvimento e suas repercussões cognitivas, emocionais, comportamentais e sociais. Também foram considerados estudos que discutissem fatores protetivos e fatores de vulnerabilidade relacionados ao desenvolvimento cerebral ao longo da vida. Foram excluídos estudos exclusivamente clínicos, farmacológicos ou biomédicos sem relação direta com os objetivos da pesquisa, publicações duplicadas, resumos de eventos científicos, editoriais, relatos de caso e materiais sem aderência temática.

A etapa de triagem ocorreu em três níveis complementares. Inicialmente, procedeu-se à leitura dos títulos dos estudos identificados. Em seguida, foram analisados os resumos e as palavras-chave, visando verificar a aderência temática ao problema de pesquisa e aos objetivos estabelecidos. Por fim, os estudos potencialmente elegíveis foram submetidos à leitura integral, permitindo aprofundamento analítico, refinamento interpretativo e confirmação de sua relevância científica.

Após a seleção dos estudos, realizou-se a extração e sistematização dos dados em matrizes analíticas, contemplando variáveis como periódico, autores, título, ano de publicação, fase do ciclo vital investigada, foco do estudo e principais contribuições dos estudos. Esse procedimento permitiu a construção de um panorama comparativo da literatura, favorecendo a identificação de convergências, divergências, tendências investigativas e lacunas do conhecimento.

Na etapa de análise e síntese, os estudos foram organizados em eixos temáticos relacionados aos principais mecanismos biológicos da neuroplasticidade, incluindo neurogênese, sinaptogênese, poda sináptica, mielinização, remodelação neural, neurotransmissão, fatores neurotróficos e mecanismos epigenéticos. Também foram analisadas as diferentes janelas de oportunidade do desenvolvimento, com destaque para o período pré-natal, a primeira infância e a adolescência, bem como os fatores moduladores associados à nutrição, atividade física, qualidade do sono, experiências de cuidado, vínculos afetivos, estimulação ambiental, contexto socioeconômico, estresse e exposição a condições adversas.

Por fim, procedeu-se à síntese interpretativa das evidências, buscando compreender como os mecanismos de neuroplasticidade interagem com fatores biológicos e ambientais na construção das competências cognitivas, emocionais e sociais ao longo do desenvolvimento humano. Essa síntese permitiu identificar fatores de proteção, fatores de vulnerabilidade e

oportunidades de intervenção capazes de favorecer trajetórias mais saudáveis de desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital.

Dessa forma, a metodologia adotada possibilitou uma análise ampla, organizada e sistematizada da literatura científica, contribuindo para o avanço da compreensão sobre os mecanismos que regulam a neuroplasticidade e o desenvolvimento cerebral, bem como sobre os fatores que potencializam ou comprometem a adaptação e a reorganização dos circuitos neurais ao longo da vida.

Resultados da revisão de escopo da literatura

A revisão de escopo da literatura sobre o desenvolvimento do cérebro desde a concepção até a idade adulta foi conduzida nas bases de dados Portal de Periódicos CAPES, PubMed e Scopus, utilizando descritores relacionados ao desenvolvimento cerebral, ciclo vital, regulação emocional, competências socioemocionais, cuidado parental e educação ("brain development" OR "neurodevelopment") AND ("child*" OR "adolescen*" OR "lifespan") AND ("emotional regulation" OR "socioemotional development" OR "personality development") AND ("education" OR "parenting" OR "caregiving"). Os resultados obtidos a partir do processo de busca, triagem inicial, exclusão e seleção dos estudos encontram-se sistematizados na Figura 1.

Figura 1

Resultados da revisão sistemática da literatura por base de dados

Base de dados	Registros identificados	Registros excluídos na triagem inicial (títulos, resumos e palavras-chave)	Artigos avaliados em texto completo (elegibilidade)	Artigos excluídos após leitura integral	Estudos incluídos na revisão
CAPES	114	73	41	24	17
PubMed	219	170	49	29	20
SCOPUS	198	170	28	11	17
Total geral	531	413	118	64	54

Fonte: Elaborado pelos autores, adaptado de PRISMA Statement (2020).

Considerando a amplitude temática e a densidade analítica do material selecionado, optou-se por organizar os resultados da revisão em três artigos científicos complementares, cada qual focalizando uma dimensão específica do neurodesenvolvimento, de modo a permitir maior aprofundamento teórico e melhor sistematização das evidências.

O primeiro artigo, intitulado “Neuroplasticidade e desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital: mecanismos, janelas de oportunidade e fatores moduladores”, tem como objetivo mapear as evidências científicas acerca da neuroplasticidade e do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, com foco nos mecanismos neurobiológicos envolvidos, nas janelas de oportunidade e nos fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais. Este artigo corresponde à primeira etapa da análise, concentrando-se nos fundamentos neurobiológicos do desenvolvimento cerebral e na compreensão dos processos gerais que sustentam a plasticidade neural ao longo da vida.

O segundo artigo, intitulado “Desenvolvimento cerebral, plasticidade neural e fatores ambientais: uma perspectiva da infância à adolescência”, tem como objetivo investigar e caracterizar as evidências científicas sobre o desenvolvimento cerebral da primeira infância à adolescência, com ênfase nos mecanismos de neuroplasticidade, nos períodos sensíveis e nos fatores biológicos, ambientais e sociais que modulam a organização dos circuitos neurais. Sua análise concentra-se nas especificidades das etapas iniciais do desenvolvimento e nos processos de formação e reorganização neural.

O terceiro artigo, intitulado “Janelas de oportunidade do neurodesenvolvimento: evidências científicas e recomendações para a promoção das competências cognitivas, emocionais e sociais”, tem como objetivo analisar os fatores que influenciam o neurodesenvolvimento infantil e adolescente, visando elaborar recomendações e parâmetros orientadores para a promoção do desenvolvimento cerebral saudável, prevenção de riscos e fortalecimento das competências cognitivas, emocionais e sociais.

Desse modo, embora os três estudos compartilhem a mesma base metodológica e o mesmo conjunto inicial de estudos selecionados, cada artigo apresenta recortes analíticos próprios e complementares. No presente artigo, correspondente à primeira etapa dessa investigação, prioriza-se a análise dos fundamentos gerais da neuroplasticidade e do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, constituindo a base conceitual e biológica para os desdobramentos analíticos apresentados nos estudos subsequentes.

Critérios de inclusão

Foram incluídos na revisão de escopo da literatura os estudos que atenderam **simultaneamente** aos seguintes critérios:

- **Tema central:** artigos que abordam explicitamente o desenvolvimento do cérebro e a formação socioemocional ao longo do ciclo vital, contemplando fases como gestação, primeira infância, infância, adolescência e vida adulta jovem;
- **Enfoque teórico ou empírico:** publicações com análise neurobiológica e/ou psicossocial do desenvolvimento, incluindo processos como neurogênese, sinaptogênese, poda sináptica, mielinização, maturação cortical, funcionamento de circuitos do estresse, memória, medo, recompensa, autorregulação, saúde mental e comportamento social;
- **Aplicabilidade prática:** estudos que apresentam implicações, mecanismos explicativos ou achados com potencial de fundamentar recomendações voltadas a cuidadores e professores, tais como organização do ambiente, rotinas, práticas parentais e educativas, prevenção de riscos, promoção da autorregulação e da saúde mental;
- **Base de dados:** artigos indexados e recuperados exclusivamente nas bases de dados Periódicos CAPES, PubMed e Scopus;
- **Idioma e disponibilidade:** publicações com acesso ao texto completo e identificação bibliográfica completa, incluindo autoria, periódico, ano de publicação, redigidas em português, inglês ou espanhol.

Critérios de exclusão

Foram excluídos da revisão os estudos que apresentaram uma ou mais das seguintes características, mantendo coerência com o modelo metodológico adotado no texto anexo:

- **Foco exclusivamente clínico, biomédico ou farmacológico:** estudos sem articulação com o desenvolvimento socioemocional, educação, cuidado parental ou implicações comportamentais ao longo do ciclo vital;
- **Condições neurológicas específicas, reabilitação física ou desempenho motor isolado:** pesquisas centradas em patologias neurológicas específicas, processos de reabilitação ou desempenho motor, sem abordagem do desenvolvimento global do cérebro e sem relação com a formação socioemocional;

- **Habilidades cognitivas isoladas sem dimensão socioemocional:** estudos que analisam habilidades cognitivas específicas, como desempenho matemático ou linguístico, sem vínculo com regulação emocional, comportamento social, autorregulação ou saúde mental;
- **Tipos de publicação não elegíveis:** editorial, resumo de congresso, relato de caso, comentários, cartas ao editor;
- **Duplicidade:** artigos duplicados entre diferentes estratégias de busca, versões preliminares do mesmo estudo ou duplicatas geradas durante o processo de exportação e organização das referências.

Revisão e seleção dos estudos

A seleção foi realizada em três etapas metodológicas complementares, seguindo o modelo do texto anexo.

- **Busca inicial e triagem** (fase exploratória): busca de artigos nas bases de dados utilizando descritores relacionados ao desenvolvimento cerebral, ciclo vital, regulação emocional, competências socioemocionais, cuidado parental e educação;
- **Tratamento de duplicidades e triagem por títulos, resumos e palavras-chave:** foram removidos artigos por duplicidade e na triagem por títulos, resumos e palavras-chave, foram excluídos os que não apresentaram relação direta com desenvolvimento do cérebro e formação socioemocional ao longo do ciclo vital, ou por não permitirem implicações práticas voltadas a cuidadores e professores
- **Leitura integral e síntese analítica:** leitura integral dos artigos selecionados artigos por apresentarem aderência direta aos objetivos do projeto e utilidade para fundamentar recomendações práticas.

Resultados da base de dados Periódicos CAPES

Revisão e seleção dos estudos

- Busca inicial e triagem (fase exploratória): foram identificados 114 artigos na base de dados Periódicos CAPES utilizando descritores relacionados a desenvolvimento cerebral, ciclo vital, regulação emocional, competências socioemocionais, cuidado parental e educação;
- Tratamento de duplicidades e triagem por títulos, resumos e palavras-chave: Após a identificação inicial dos 114 registros e remoção das duplicidades, procedeu-se à triagem por títulos, resumos e palavras-chave, conforme recomendado pelo protocolo PRISMA 2020. Nessa etapa, 73 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade ou por não apresentarem relação direta com o desenvolvimento cerebral e a formação socioemocional ao longo do ciclo vital. Assim, 41 artigos permaneceram para avaliação em texto completo;
- Leitura de títulos, resumos e palavras-chave: após leitura integral dos 41 artigos, 24 artigos foram excluídos por não apresentarem relação direta com o desenvolvimento do cérebro e a formação socioemocional ao longo do ciclo vital, por possuírem foco estritamente clínico, motor, nutricional específico ou por não contemplarem implicações educativas ou de cuidado. Foram selecionados 17 artigos por apresentarem aderência direta aos objetivos do projeto e utilidade para fundamentar recomendações práticas.

Figura 2

Diagrama prisma – Base CAPES

IDENTIFICAÇÃO	Registros identificados na base CAPES	(n = 114)
TRIAGEM INICIAL	Artigos excluídos após leitura de títulos, resumos, duplicatas e aplicação dos critérios de exclusão	(n = 73)
	Artigos selecionados após triagem inicial	(n = 41)
TRIAGEM FINAL / ELEGIBILIDADE	Artigos excluídos após leitura integral e avaliação de elegibilidade	(n = 24)
INCLUSÃO	Artigos selecionados para leitura e análise qualitativa final	(n = 17)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Figura 3

Caracterização dos estudos selecionados na revisão de escopo na base de dados CAPES sobre desenvolvimento neurobiológico ao longo do ciclo vital

Nº	Periódico	Autores	Título	Ano	Fase do ciclo vital	Foco do estudo	Contribuição principal
1	Research, Society and Development	Silva; Silva; Andrade	Exposição fetal ao álcool e seus efeitos no neurodesenvolvimento infantil	2024	Pré-natal	Exposição fetal ao álcool	Déficits cognitivos, comportamentais e sociais
2	Research, Society and Development	Santos et al.	Impactos da depressão gestacional no desenvolvimento fetal	2023	Pré-natal	Depressão gestacional	Alterações cerebrais fetais e desfechos neonatais
3	Rev. Paulista de Pediatria	Zomignani; Zambelli; Antonio	Desenvolvimento cerebral em recém-nascidos prematuros	2009	Neonatal	Prematuridade	Déficits cognitivos e motores
4	Ensino em Re-Vista	Crespi; Noro; Nóbile	Neurodesenvolvimento na primeira infância	2020	Primeira infância	Maturação cerebral	Importância das experiências iniciais
5	BJNS	Santana et al.	A influência dos fatores multidimensionais e o neurodesenvolvimento infantil	2024	Infância	Fatores biológicos, ambientais e sociais	Influência multidimensional no desenvolvimento
6	Audiology Communication Research	Alpes et al.	Linguagem oral, processamento fonológico e memória visuoespacial	2022	Infância	Nutrição, linguagem e memória	Prejuízos associados à subnutrição
7	Brazilian Journal of Development	Moreira et al.	Consequências do tempo de tela precoce	2021	Infância	Tempo de tela	Impactos sobre cognição e linguagem
8	Cuadernos de Educación y Desarrollo	Vaz et al.	Ansiedade na infância e atraso do desenvolvimento cerebral	2024	Infância	Ansiedade	Alterações estruturais cerebrais
9	Arquivos do MUDI	Fernandes; Melo	Relação entre pobreza e desenvolvimento cerebral	2019	Infância	Pobreza	Comprometimento do desenvolvimento cerebral
10	Brazilian Journal of Development	Freitas; Ariosi	Toda criança tem direito a apego	2021	Infância	Apego	Importância dos vínculos afetivos
11	Diaphora	Nunes et al.	Impacto dos maus-tratos na infância	2020	Infância	Trauma	Alterações cerebrais e cognitivas
12	Revista Inova Saúde	Pesenti; Magenis;	Modulação da microbiota	2019	Infância e adolescência	Microbiota	Influência no eixo intestino-

		Macan	intestinal		ncia		cérebro
13	Arquivos do MUDI	Oliveira et al.	Neuroplasticidade e educação	2019	Infância e adolescência	Plasticidade neural	Base para aprendizagem e memória
14	Revista Cognitionis	Lopes	A neurociência à serviço da aprendizagem e da educação	2020	Infância e adolescência	Aprendizagem	Integração neurociência e educação
15	Revista JRG	Campos et al.	Tratamentos para TDAH em crianças	2025	Infância	TDAH	Autorregulação e atenção
16	Brazilian Journal of Development	Matias; Reis; Besson	Transtorno de Personalidade Borderline	2023	Adolescência	Personalidade	Trauma e desenvolvimento
17	Rev. Bras. Med. Esporte	Vorkapic-Ferreira et al.	Nascidos para correr	2017	Adolescência e vida adulta	Exercício	Benefícios para cognição e cérebro

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Resultados da base de dados PubMed

Revisão e seleção dos estudos

- Busca inicial e triagem (fase exploratória): foram identificados 219 artigos na base PubMed, utilizando descritores relacionados a desenvolvimento cerebral, ciclo vital, regulação emocional, competências socioemocionais, cuidado parental e educação;
- Tratamento de duplicidades e triagem por títulos, resumos e palavras-chave: Após a identificação inicial dos 219 registros e remoção das duplicidades, procedeu-se à triagem por títulos, resumos e palavras-chave, conforme recomendado pelo protocolo PRISMA 2020. Nessa etapa, 170 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade ou por não apresentarem relação direta com o desenvolvimento cerebral e a formação socioemocional ao longo do ciclo vital. Assim, 49 artigos permaneceram para avaliação em texto completo;
- Leitura integral e síntese analítica: após leitura integral dos 49 artigos, 29 artigos foram excluídos por manterem foco estritamente clínico, experimental sem relação com desfechos socioemocionais, ou por não contribuírem para recomendações aplicáveis a contextos familiares e escolares. Foram selecionados 20 artigos por apresentarem aderência direta aos objetivos do projeto e utilidade para fundamentar recomendações práticas.

Figura 4

Diagrama Prisma – Base PubMeb

IDENTIFICAÇÃO	Registros identificados na base PubMed	(n = 219)
TRIAGEM INICIAL	Artigos excluídos após leitura de títulos, resumos, duplicatas e aplicação dos critérios de exclusão	(n = 170)
	Artigos selecionados após triagem inicial	(n = 49)
TRIAGEM FINAL / ELEGIBILIDADE	Artigos excluídos após leitura integral e avaliação de elegibilidade	(n = 29)
INCLUSÃO	Artigos selecionados para leitura e análise qualitativa final	(n = 20)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Figura 5

Caracterização dos estudos selecionados na revisão de escopo na base de dados PubMed sobre desenvolvimento neurobiológico ao longo do ciclo vital

Nº	Periódico	Autores	Título	Ano	Fase do ciclo vital	Foco do estudo	Contribuição principal
1	Brain Sciences	Leisman, Alfasi e D'Angiulli	Emotional Brain Development	2025	Período fetal e primeira infância	Desenvolvimento emocional	Formação dos circuitos emocionais e influência do cuidado parental.
2	Neuroscience	Ortiz-Valladares et al.	Bridging the gap	2024	Pré-natal e adolescência	Nutrição e mielinização	Desnutrição pré-natal e vulnerabilidade psiquiátrica.
3	Neuropsychopharmacology Reviews	Tau e Peterson	Normal Development of Brain Circuits	2010	Gestação à adolescência	Circuitos neurais	Maturação dos circuitos neurais.
4	Pediatric Clinics of North America	Spates et al.	Behavioral Aspects of Trauma in Children and Youth	2003	Infância e adolescência	Trauma psicológico	Impactos do trauma no desenvolvimento.
5	Developmental Cognitive Neuroscience	Ramsaran et al.	The Ontogeny of Memory Persistence and Specificity	2019	Infância	Memória	Desenvolvimento da memória.
6	Sleep Medicine Reviews	Maski e Kothare	Sleep Deprivation and Neurobehavioral Functioning in Children	2013	Infância	Sono	Efeitos da privação de sono.
7	Developmental Cognitive	Thijssen et al.	Early Childhood	2023	Primeira infância à	Ambiente familiar	Influência das ameaças

	Neuroscienc e		Family Threat		adolescência		familiares.
8	Neuroscienc e	Jing, Jia-Qi et al.	Physical activity promotes brain developmen t through serotonin during early childhood	2024	Primeira infância	Atividade física, serotonina e desenvolvi mento cerebral.	Aponta a serotonina como mediadora dos benefícios da atividade física para o cérebro infantil.
9	Trends in Cognitive Sciences	Paus	Mapping Brain Maturation	2005	Adolescênci a	Maturação cerebral	Alterações estruturais e cognição.
10	Current Opinion in Psychology	Silvers	Emotion Regulation Developmen t	2022	Adolescênci a	Regulação emocional	Adolescênci a como período crítico.
11	Neuroscienc e and Biobehavior al Reviews	Murty et al.	Role of Experience	2016	Adolescênci a	Cognição	Experiência e funções executivas.
12	Biological Psychiatry	Modabberni a et al.	ABCD Study	2021	Adolescênci a inicial	Ambiente e cérebro	Associações cérebro- comportame nto.
13	Brain Research	Juraska e Willing	Pubertal Onset	2017	Puberdade e adolescência	Puberdade	Marco para reorganizaçã o cerebral.
14	BMC Pediatrics	Bray et al.	PANDA	2024	Adolescênci a	Puberdade e ansiedade	Hormônios e regulação emocional.
15	Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology	Vigil et al.	Endocrine Modulation	2013	Adolescênci a	Hormônios	Modulação hormonal do cérebro.
16	Neuroscienc e and Biobehavior al Reviews	Schulz e Sisk	Organizing Actions	2016	Adolescênci a	Hormônios gonadais	Papel organizador hormonal.
17	Frontiers in Neuroscienc e	Sicher et al.	Alcohol and Stress Exposure	2022	Adolescênci a	Estresse e álcool	Alterações neurocircuita is.
18	Translationa l Psychiatry	Selemon	Synaptic Plasticity	2013	Adolescênci a	Plasticidad e neural	Funções executivas e poda sináptica.
19	Developmen tal Psychobiolo gy	Kirkland et al.	Synaptic Pruning	2024	Adolescênci a	Poda sináptica	Comportame nto social adulto.
20	Mindfulness	Sanger e Dorjee	Mindfulness Training	2015	Adolescênci a	Intervençã o neuropsicol ógica	Autorregulaç ão e atenção.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Resultados da base de dados SCOPUS

Revisão e seleção dos estudos

- Busca inicial e triagem (fase exploratória): foram identificados 198 artigos na base Scopus, utilizando descritores relacionados ao desenvolvimento cerebral, ciclo vital;
- Tratamento de duplicidades e triagem por títulos, resumos e palavras-chave
Após a identificação inicial dos 198 registros e remoção das duplicidades, procedeu-se à triagem por títulos, resumos e palavras-chave, conforme recomendado pelo protocolo PRISMA 2020. Nessa etapa, 170 estudos foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade ou por não apresentarem relação direta com o desenvolvimento cerebral e a formação socioemocional ao longo do ciclo vital. Assim, 28 artigos permaneceram para avaliação em texto completo;
- Leitura integral e síntese analítica: após leitura integral dos 28 artigos, 11 foram excluídos por manterem foco estritamente clínico, experimental sem relação com desfechos socioemocionais, ou por não contribuírem para recomendações aplicáveis a contextos familiares e escolares. Foram selecionados 17 artigos por apresentarem aderência direta aos objetivos do projeto e utilidade para fundamentar recomendações práticas.

Figura 6

Diagrama Prisma – Base Scopus

IDENTIFICAÇÃO	Registros identificados na base Scopus	(n = 198)
TRIAGEM INICIAL	Artigos excluídos após leitura de títulos, resumos, duplicatas e aplicação dos critérios de exclusão	(n = 170)
	Artigos selecionados após triagem inicial	(n = 28)
TRIAGEM FINAL / ELEGIBILIDADE	Artigos excluídos após leitura integral e avaliação de elegibilidade	(n = 11)
INCLUSÃO	Artigos selecionados para leitura e análise qualitativa final	(n = 17)

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Figura 7

Caracterização dos estudos selecionados na revisão de escopo na base de dados Scopus sobre desenvolvimento neurobiológico ao longo do ciclo vital

Nº	Periódico	Autores	Título	Ano	Fase do ciclo vital	Foco do estudo	Contribuição principal
1	Frontiers in Human Neuroscience	Nyaradi et al.	The role of nutrition in children's neurocognitive development, from pregnancy through childhood	2013	Pré-natal e infância	Nutrição e cognição	Influência da nutrição no desenvolvimento cognitivo.
2	Keio Journal of Medicine	Gordon	Roots of Empathy: responsive parenting, caring societies	2003	Primeira infância	Empatia e parentalidade	Parentalidade responsiva favorece regulação emocional.
3	PNAS	Christakis et al.	How early media exposure may affect cognitive function	2018	Primeira infância	Mídia e atenção	Exposição precoce à mídia associada a déficits atencionais.
4	Progress in Neurobiology	Berger et al.	Multidisciplinary perspectives on attention and the development of self-regulation	2007	Infância	Autorregulação	Atenção e maturação frontal sustentam autorregulação.
5	Frontiers in Human Neuroscience	Jolles; Crone	Training the developing brain	2012	Infância e adolescência	Plasticidade neural	Potencial do treinamento cognitivo.
6	Current Opinion in Behavioral Sciences	Dumontheil	Adolescent brain development	2016	Adolescência	Cognição	Amadurecimento cognitivo e cerebral.
7	Journal of Child Psychology and Psychiatry	Blakemore; Choudhury	Development of the adolescent brain	2006	Adolescência	Funções executivas	Mielinização e funções executivas.
8	Neuropsychiatric Disease and Treatment	Arain et al.	Maturation of the adolescent brain	2013	Adolescência	Hormônios	Hormônios influenciam mielinização e comportamento.
9	Neuroscience & Biobehavioral Reviews	Brenhouse; Schwarz	Immunoadolescence	2016	Adolescência	Neuroimunologia	Sistema imune participa da maturação cerebral.
10	Neurotoxicology and Teratology	Dow-Edwards et al.	Experience during adolescence shapes brain	2019	Adolescência	Plasticidade neural	Experiências moldam circuitos neurais.

			development				
11	Physiology & Behavior	Gabriel et al.	Impact of enriched environment during adolescence	2020	Adolescência	Ambiente enriquecido	Aumento da densidade sináptica e memória social.
12	Alcoholism: Clinical and Experimental Research	Crews et al.	Mechanisms of Persistent Neurobiological Changes Following Adolescent Alcohol Exposure	2019	Adolescência	Álcool e cérebro	Alterações persistentes do neurodesenvolvimento.
13	Frontiers in Human Neuroscience	Buyanova; Arsalidou	Cerebral White Matter Myelination	2021	Adolescência	Mielinização	Substância branca e cognição.
14	Alcohol	Cardenas et al.	Greater fractional anisotropy in adolescents with alcohol use disorders	2013	Adolescência	Substância branca	Possível marcador de risco para AUD.
15	Behavioural Brain Research	Harris et al.	Juvenile stress exerts sex-independent effects on anxiety	2022	Adolescência	Estresse	Efeitos duradouros sobre ansiedade.
16	Translational Psychiatry	Damme et al.	Physical and mental health in adolescence	2024	Adolescência	Saúde mental	Atividade física associada a melhor saúde mental.
17	Depression and Anxiety	Dincheva; Lynch; Lee	The role of BDNF in the development of fear learning	2016	Adolescência	Medo e BDNF	BDNF participa da maturação dos circuitos do medo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

Embora a seleção dos estudos tenha sido conduzida de forma sistematizada nas bases de dados definidas para a revisão de escopo, ao longo do processo de leitura, análise dos resultados e elaboração do referencial teórico, outras publicações científicas de elevada relevância temática foram incorporadas com a finalidade de complementar, aprofundar e atualizar aspectos específicos do desenvolvimento neurológico e socioemocional ao longo do ciclo vital. Essas inclusões permitiram ampliar a compreensão de temas relacionados à privação psicossocial e aos períodos sensíveis do desenvolvimento (Nelson et al., 2019), à influência da nutrição nos primeiros mil dias de vida e na maturação cerebral (Cusick et al., 2016), à importância do cuidado responsivo e dos ambientes promotores do desenvolvimento infantil (Black et al., 2017; Britto et al., 2017), bem como aos impactos da depressão e da ansiedade maternas durante a gestação sobre o crescimento fetal e o neurodesenvolvimento infantil (Litzky et al., 2018). A incorporação

dessas referências complementares teve caráter analítico e interpretativo, contribuindo para o fortalecimento da fundamentação teórica, para a contextualização interdisciplinar dos achados, para a ampliação da compreensão das interações entre fatores biológicos, ambientais e sociais no neurodesenvolvimento.

Figura 8

Referências complementares incorporadas ao referencial teórico e suas contribuições para o estudo do neurodesenvolvimento ao longo do ciclo vital

Nº	Periódico	Autores	Título	Ano	Fase do ciclo vital	Foco do estudo	Contribuição principal
1	Child Development Perspectives	Nelson et al.	How Early Experience Shapes Human Development: The Case of Psychosocial Deprivation	2019	Primeira infância	Privação psicossocial e períodos sensíveis do desenvolvimento	Demonstra que a privação de cuidados e estímulos nos primeiros anos de vida compromete o desenvolvimento cerebral, cognitivo, emocional e social, evidenciando a existência de períodos sensíveis para a plasticidade neural.
2	The Lancet Child & Adolescent Health	Cusick e Geoffrey	The Role of Nutrition in Brain Development: The Golden Opportunity of the “First 1000 Days”	2016	Período pré-natal e primeiros mil dias de vida	Nutrição e desenvolvimento cerebral	Evidencia que a nutrição adequada durante a gestação e a primeira infância é essencial para neurogênese, mielinização, formação de sinapses e desenvolvimento cognitivo.
3	The Lancet	Black et al.	Early Childhood Development Coming of Age: Science Through the Life Course	2017	Primeira infância	Desenvolvimento infantil e fatores promotores do desenvolvimento	Apresenta evidências sobre a influência dos cuidados precoces, da saúde, da nutrição e da estimulação no desenvolvimento cognitivo, emocional e social ao longo da vida.
4	The Lancet	Britto et al.	Nurturing Care: Promoting Early Childhood Development	2017	Primeira infância	Cuidado responsivo e desenvolvimento infantil	Demonstra que o cuidado responsivo, a proteção, a saúde, a nutrição adequada e as oportunidades de aprendizagem

							constituem os principais pilares para o desenvolvimento integral da criança.
5	Pediatric Research	Litzky et al.	Prenatal Exposure to Maternal Depression and Anxiety on Imprinted Gene Expression in Placenta and Infant Neurodevelopment and Growth	2018	Gestação e período neonatal	Depressão e ansiedade maternas durante a gestação	Demonstra que a exposição pré-natal à depressão e à ansiedade maternas altera a expressão de genes placentários relacionados ao crescimento fetal e ao neurodesenvolvimento, evidenciando mecanismos biológicos pelos quais o estresse materno pode influenciar o desenvolvimento infantil.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026)

A metodologia adotada foi estruturada para assegurar abrangência, rigor analítico e coerência na sistematização das evidências científicas relacionadas à neuroplasticidade e ao desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital. Ao privilegiar uma revisão de escopo, o estudo possibilitou integrar conhecimentos provenientes de diferentes áreas, como neurociência, psicologia do desenvolvimento, educação e saúde, favorecendo uma compreensão ampliada dos mecanismos biológicos envolvidos na plasticidade cerebral, das janelas de oportunidade do desenvolvimento e dos fatores que modulam a organização e a reorganização dos circuitos neurais. A organização dos achados em categorias temáticas e fases do ciclo vital permitiu identificar processos neurobiológicos essenciais, períodos sensíveis do desenvolvimento, fatores protetivos e fatores de vulnerabilidade que influenciam as trajetórias de desenvolvimento cognitivo, emocional e social. Além disso, a sistematização das evidências contribuiu para compreender como fatores biológicos, ambientais, comportamentais e psicossociais interagem na construção e adaptação do sistema nervoso ao longo da vida. Dessa forma, a metodologia adotada constituiu um caminho adequado para mapear o estado atual do conhecimento científico sobre a neuroplasticidade, fornecendo subsídios para a compreensão dos mecanismos que favorecem ou comprometem o desenvolvimento cerebral e para a identificação de oportunidades de intervenção e promoção do desenvolvimento humano ao longo do ciclo vital.

FUNDAMENTOS NEUROBIOLÓGICOS DA NEUROPLASTICIDADE

A compreensão da neuroplasticidade exige o reconhecimento de que o desenvolvimento cerebral é sustentado por uma complexa rede de mecanismos biológicos que atuam de forma integrada desde as fases iniciais da vida. Nesse sentido, este item apresenta os fundamentos neurobiológicos que sustentam a capacidade adaptativa do cérebro, abordando, inicialmente, a neuroplasticidade como base estruturante do neurodesenvolvimento, desde o período pré-natal até a influência da nutrição e das experiências ambientais na construção da arquitetura neural. Em seguida, são discutidos os mecanismos centrais que tornam essa plasticidade possível, como a neurogênese, a plasticidade sináptica, a poda neural, a ação dos neurotransmissores e dos fatores neurotróficos, além dos processos epigenéticos e neuroimunes que regulam a expressão gênica associada ao desenvolvimento cerebral. Por fim, o item avança para a análise de sistemas reguladores e fatores moleculares que modulam esses processos, como o sistema endocanabinoide, a dopamina, o fator neurotrófico derivado do cérebro e os mecanismos de remodelação da cromatina. Dessa forma, o presente item oferece ao leitor uma visão integrada dos principais substratos biológicos que sustentam a formação, a reorganização e o refinamento dos circuitos neurais, evidenciando como a plasticidade cerebral se constitui como base essencial da aprendizagem, da memória, da regulação emocional e da adaptação ao longo do ciclo vital.

Neuroplasticidade como fundamento do desenvolvimento cerebral

A neuroplasticidade constitui o alicerce biológico sobre o qual se estrutura o desenvolvimento cerebral, pois representa a capacidade do sistema nervoso de modificar-se continuamente em resposta às exigências internas e às influências do ambiente. Sob essa perspectiva, o cérebro não deve ser compreendido como uma estrutura estática, mas como um sistema dinâmico, em permanente reorganização, cuja arquitetura funcional é construída a partir da interação entre predisposições biológicas, condições nutricionais, experiências relacionais e estímulos ambientais. Desde o período pré-natal, mecanismos de proliferação celular, migração neuronal, formação sináptica e mielinização estabelecem as bases iniciais dessa plasticidade, que se intensifica nos primeiros anos de vida e permanece ativa ao longo de diferentes fases do desenvolvimento. Nesse contexto, este subitem discute como fatores como gestação, nutrição e experiências ambientais participam diretamente da modelagem dos circuitos neurais,

evidenciando que a plasticidade cerebral constitui o princípio essencial que sustenta a aprendizagem, a memória, a regulação emocional e a adaptação comportamental ao longo do ciclo vital.

Neurodesenvolvimento desde o período pré-natal

O desenvolvimento neurobiológico humano constitui um processo dinâmico, contínuo e profundamente influenciado pela interação entre fatores biológicos, genéticos, ambientais, sociais e culturais. Diferentemente das concepções deterministas que atribuíam à herança genética a responsabilidade predominante pela formação cerebral, as evidências contemporâneas demonstram que o cérebro permanece em constante reorganização estrutural e funcional ao longo da vida, respondendo continuamente às experiências vivenciadas pelo indivíduo. Nesse contexto, a neuroplasticidade destaca-se como um dos principais mecanismos biológicos responsáveis pela adaptação do sistema nervoso às demandas internas e externas, possibilitando a remodelação dos circuitos neurais, a formação de novas conexões sinápticas e o refinamento das funções cognitivas, emocionais e comportamentais.

O neurodesenvolvimento inicia-se precocemente durante a vida intrauterina, período marcado por intensa proliferação celular, migração neuronal e organização das primeiras estruturas cerebrais (Crespi; Noro; Nóbile, 2020). Desde as fases iniciais da gestação, ocorrem processos altamente especializados que estabelecem as bases anatômicas e funcionais do sistema nervoso. Essas transformações prosseguem após o nascimento e tornam-se particularmente intensas durante os primeiros anos de vida, quando ocorre acelerada formação de conexões sinápticas, expansão da arborização dendrítica e progressivo aumento da mielinização⁵.

Segundo Crespi, Noro e Nóbile (2020), os três primeiros anos de vida representam uma das fases de maior plasticidade observadas ao longo do ciclo vital. Nessa etapa, o cérebro infantil apresenta extraordinária capacidade adaptativa, tornando-se especialmente receptivo às influências ambientais e às experiências de aprendizagem. Tal característica permite que estímulos provenientes do ambiente exerçam profunda influência sobre a organização e o refinamento dos circuitos neurais.

⁵ **Mielinização:** processo de formação da bainha de mielina ao redor dos axônios, aumentando a velocidade e a eficiência da transmissão dos impulsos nervosos entre diferentes regiões do sistema nervoso.

Nos três primeiros anos de vida, a arquitetura cerebral passa por intensas transformações estruturais em resposta à interação entre fatores biológicos, experiências e relações interpessoais que a criança estabelece no meio que a cerca. Nesse período, os neurônios presentes no sistema nervoso passam a associar-se e, estando associados uns aos outros, criam redes neurais que se fortalecem à medida que são utilizados com maior frequência (Crespi et al., 2020, p. 1526).

As condições gestacionais exercem papel decisivo nesse processo inicial de organização cerebral. Conforme Zomignani et al. (2009), Santos et al. (2023) e Silva et al. (2024), fatores como prematuridade, alterações metabólicas maternas, exposição fetal ao álcool e outros agentes teratogênicos⁶ podem modificar trajetórias neurobiológicas determinantes, produzindo repercussões duradouras sobre a cognição, a regulação emocional e o comportamento social. Em consonância com essa perspectiva, Litzky (2018) destaca que transtornos psiquiátricos maternos, especialmente a depressão durante a gestação, podem interferir diretamente na formação cerebral fetal, alterando mecanismos de expressão gênica placentária e influenciando processos precoces de processamento sensorial no recém-nascido.

Cada fase do desenvolvimento e crescimento cerebral tem seu tempo e não ocorre individualmente, sobrepondo-se à evolução da gestação. O nascimento prematuro interrompe a evolução normal desses eventos e as crianças nascidas prematuramente são consideradas de risco em relação ao neurodesenvolvimento e às incapacidades funcionais. Isso acontece devido à vulnerabilidade do cérebro na ocasião do nascimento. Tal vulnerabilidade pode levar a anormalidades anatômicas, mais frequentes nessas crianças do que em controles nascidos a termo. Essas anormalidades podem interferir nas capacidades funcionais, cognitivas e comportamentais, causando déficits que persistem até a adolescência e vida adulta” (Zomignani et al., 2009, p. 199).

Dessa forma, o período pré-natal não representa apenas o início cronológico do desenvolvimento humano, mas também uma fase decisiva para a construção das bases estruturais e funcionais que sustentarão o desenvolvimento cognitivo, emocional e social ao longo da vida.

Nutrição e desenvolvimento cerebral

Entre os fatores biológicos que influenciam o neurodesenvolvimento, a nutrição ocupa posição de destaque desde o período pré-natal. O adequado fornecimento de nutrientes durante as fases iniciais da vida constitui condição indispensável para a formação e maturação do sistema

⁶ **Teratogênicos:** agentes físicos, químicos ou biológicos capazes de interferir no desenvolvimento embrionário e fetal, podendo provocar malformações congênitas, alterações funcionais ou prejuízos ao desenvolvimento neurobiológico.

nervoso, influenciando diretamente processos epigenéticos, citogenéticos e neuroquímicos⁷ envolvidos na organização cerebral (Ortiz-Valladares et al., 2024).

Segundo Ortiz-Valladares et al. (2024), déficits nutricionais precoces podem comprometer a maturação dos oligodendrócitos⁸ e a formação da bainha de mielina, estrutura responsável por aumentar a velocidade e a eficiência da transmissão dos impulsos nervosos. Como consequência, prejuízos nutricionais ocorridos em períodos críticos do desenvolvimento podem repercutir sobre a qualidade da comunicação neural e comprometer processos cognitivos futuros.

O aleitamento materno também desempenha papel relevante nesse contexto. Conforme Chade et al. (2024), o leite materno fornece nutrientes, anticorpos e compostos bioativos indispensáveis ao desenvolvimento cerebral, contribuindo para o desempenho cognitivo, motor e socioemocional da criança. Além de atender às necessidades nutricionais básicas, o aleitamento favorece mecanismos biológicos relacionados à maturação neural e ao fortalecimento dos vínculos afetivos, elementos relevantes para o desenvolvimento saudável.

Por outro lado, a desnutrição durante períodos sensíveis do desenvolvimento pode provocar alterações significativas na organização estrutural e funcional do sistema nervoso central. Cusick (2016) ressalta que déficits nutricionais precoces estão associados a prejuízos em funções superiores relacionadas à memória, à aprendizagem e à maturação hipocampal. Essas alterações podem ampliar vulnerabilidades neurofuncionais e comprometer trajetórias de desenvolvimento ao longo da vida.

A vulnerabilidade de um processo, região ou circuito cerebral em desenvolvimento a um déficit nutricional precoce baseia-se em dois fatores: o momento em que ocorre essa deficiência e a necessidade que essa região possui daquele nutriente naquele período. Como observado, o momento de pico do desenvolvimento do hipocampo e do córtex pré-frontal difere entre si. O momento em que ocorre um evento ambiental adverso que afeta, por exemplo, a arborização dendrítica neuronal determinará se o hipocampo ou o córtex pré-frontal sofrerá maior dano e comprometimento de sua integridade funcional. Quanto mais precoce for a agressão, maior a probabilidade de o hipocampo ser mais afetado do que o córtex pré-frontal (Cusick et al., 2016, p. 17).

⁷ **Epigenéticos, citogenéticos e neuroquímicos:** mecanismos biológicos relacionados, respectivamente, à regulação da expressão gênica sem alteração da sequência do DNA (epigenéticos), às características estruturais e funcionais dos cromossomos (citogenéticos) e aos processos químicos envolvidos na comunicação entre neurônios por meio de neurotransmissores e outras moléculas sinalizadoras (neuroquímicos).

⁸ **Oligodendrócitos:** células da glia responsáveis pela produção da bainha de mielina no sistema nervoso central, estrutura que envolve os axônios e aumenta a velocidade de transmissão dos impulsos nervosos.

Diante dessas evidências, a nutrição deve ser compreendida não apenas como requisito para o crescimento físico, mas também como um dos principais fatores moduladores da plasticidade cerebral, influenciando diretamente a formação dos circuitos neurais e a construção das competências cognitivas, emocionais e comportamentais.

Neuroplasticidade e experiências ambientais

A neuroplasticidade constitui um dos fundamentos centrais do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital. Segundo Lopes (2020), o cérebro permanece continuamente modificável em resposta às experiências vivenciadas, tornando os processos de aprendizagem, memória e adaptação comportamental profundamente dependentes da interação entre organismo e ambiente. Essa capacidade adaptativa permite que experiências positivas ou negativas produzam alterações estruturais e funcionais nos circuitos neurais.

De acordo com Dow-Edwards et al. (2019), as experiências ambientais atuam como verdadeiros arquitetos da circuitaria cerebral, influenciando a profundidade cortical, a ramificação dendrítica e a eficiência das conexões sinápticas. Nessa perspectiva, o ambiente deixa de ser apenas um contexto em que o desenvolvimento ocorre e passa a ser compreendido como um elemento ativo na construção e reorganização do cérebro.

As evidências demonstram que ambientes enriquecidos favorecem modificações estruturais expressivas no cérebro em desenvolvimento. Estímulos cognitivos, oportunidades de aprendizagem, interações sociais de qualidade e experiências diversificadas contribuem para a expansão das conexões neurais e para a otimização do processamento cognitivo. Em consonância com essa interpretação, Oliveira et al. (2019) demonstram que a aprendizagem contínua e o treinamento de novas habilidades produzem alterações morfológicas mensuráveis em diferentes regiões cerebrais, evidenciando que o cérebro permanece responsivo às experiências ao longo da vida.

Durante a primeira infância, essa influência ambiental torna-se ainda mais evidente. Britto et al. (2017) destacam que os primeiros anos de vida constituem uma importante janela de oportunidade para intervenções preventivas e promotoras do desenvolvimento. Nessa fase, programas voltados ao fortalecimento do vínculo de apego, à estimulação cognitiva, ao enriquecimento ambiental e à promoção de condições adequadas de nutrição apresentam elevado potencial para favorecer trajetórias positivas de desenvolvimento. De maneira semelhante, Black

et al. (2017) ressaltam que intervenções realizadas durante a primeira infância podem produzir benefícios duradouros sobre competências cognitivas, emocionais e sociais.

As experiências de cuidado também exercem papel decisivo na organização dos circuitos neurais. Conforme Britto et al. (2017), o cuidado responsivo, as interações afetivas, a qualidade do ambiente e as oportunidades de aprendizagem influenciam diretamente a consolidação das redes neurais relacionadas à aprendizagem, memória e adaptação comportamental. Em conformidade com essa perspectiva, Nelson et al. (2019) demonstram que experiências precoces positivas favorecem trajetórias mais adaptativas de desenvolvimento cerebral, enquanto ambientes marcados por privação psicossocial podem comprometer processos essenciais de organização neural.

Por outro lado, fatores ambientais adversos podem limitar o potencial adaptativo da neuroplasticidade. Santana et al. (2024) destacam que condições socioeconômicas desfavoráveis, baixa escolaridade parental, precariedade ambiental e reduzida estimulação social podem comprometer significativamente o desenvolvimento infantil. De maneira semelhante, Fernandes e Melo (2019) verificaram que a exposição prolongada à pobreza extrema, à negligência e à privação de cuidados básicos está associada a alterações estruturais em regiões cerebrais relacionadas às funções executivas, especialmente no lobo frontal.

Evidencia-se ainda, a situação da renda familiar, baixa escolaridade dos pais, precariedade do ambiente físico e pouco estímulo social, como fatores ambientais que atrasam a consolidação das esferas do desenvolvimento infantil. Para tanto, é vital o fortalecimento da vigilância familiar, em que os pais proporcionem um ambiente enriquecedor e estimulante, como também saibam reconhecer e detalhar o comportamento da criança para possíveis intervenções, quando necessário, em casos de atrasos (Santana et al., 2024, p. 2).

Assim, a neuroplasticidade evidencia que o desenvolvimento cerebral resulta de um processo contínuo de interação entre predisposições biológicas e experiências ambientais. Ao longo do ciclo vital, o cérebro permanece sensível às oportunidades de aprendizagem, aos vínculos afetivos e às condições de vida, permitindo adaptações que podem favorecer ou comprometer a construção das competências cognitivas, emocionais e sociais.

Mecanismos neurobiológicos da neuroplasticidade

A capacidade do cérebro de adaptar-se, aprender e reorganizar-se ao longo do desenvolvimento depende da atuação de mecanismos neurobiológicos altamente especializados que sustentam a plasticidade neural em seus diferentes níveis de complexidade. Embora a neuroplasticidade seja frequentemente compreendida a partir de seus efeitos sobre a aprendizagem, a memória e o comportamento, sua base reside em processos celulares e moleculares que operam de forma contínua e integrada na formação e no refinamento dos circuitos neurais. Nesse contexto, este subitem aborda os principais mecanismos responsáveis por essa dinâmica adaptativa, destacando a neurogênese como processo de renovação neuronal, a plasticidade sináptica e a poda neural como elementos centrais do fortalecimento e da eliminação seletiva de conexões, bem como a participação dos neurotransmissores, fatores neurotróficos e mecanismos epigenéticos e neuroimunes na regulação dessas transformações. Assim, compreender esses mecanismos torna-se determinante para explicar como o cérebro constrói sua arquitetura funcional e de que maneira as experiências podem influenciar, favorecer ou comprometer as trajetórias do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital.

Neurogênese, aprendizagem e memória

A capacidade do cérebro de aprender, adaptar-se e reorganizar-se ao longo da vida depende de diversos mecanismos biológicos que atuam de forma integrada na formação dos circuitos neurais. Entre esses mecanismos, a neurogênese ocupa posição de destaque por contribuir para a renovação e reorganização das redes neuronais envolvidas na aprendizagem e na memória.

Um dos exemplos mais expressivos desse fenômeno pode ser observado na amnésia infantil. Conforme Ramsaran et al. (2019), a elevada taxa de neurogênese hipocampal observada nos primeiros anos de vida promove intensa remodelação dos circuitos de memória, dificultando a retenção de lembranças episódicas de longo prazo. Embora esse processo possa parecer uma limitação da memória infantil, os autores argumentam que ele representa um importante mecanismo adaptativo, favorecendo a flexibilidade cognitiva e a reorganização funcional do cérebro em desenvolvimento.

A neurogênese, portanto, não apenas contribui para a formação de novos neurônios, mas também participa ativamente da adaptação dos circuitos neurais às exigências impostas pelo ambiente, permitindo a constante atualização das redes envolvidas na aprendizagem e na construção do conhecimento.

Plasticidade sináptica e poda neural

A plasticidade cerebral depende da capacidade dos neurônios de modificar a força e a eficiência de suas conexões em resposta à experiência. Segundo Selemon (2013), o fortalecimento ou enfraquecimento das conexões neurais ocorre de acordo com a frequência e a intensidade com que determinados circuitos são utilizados. Quando grupos de neurônios são ativados de forma coordenada e repetida, as conexões entre eles tornam-se mais fortes e eficientes, favorecendo a consolidação de circuitos relacionados à aprendizagem, memória e controle comportamental.

Por outro lado, conexões pouco utilizadas tendem a enfraquecer progressivamente, tornando-se candidatas à eliminação durante o processo de poda sináptica. Esse mecanismo permite que o cérebro preserve circuitos mais eficientes e elimine conexões menos funcionais, contribuindo para o refinamento da organização neural.

Conforme Selemon (2013), durante os períodos iniciais do desenvolvimento predominam formas de receptores neuronais que favorecem o fortalecimento das conexões sinápticas. À medida que o cérebro amadurece, ocorre uma substituição gradual por formas associadas à estabilidade neural, reduzindo a capacidade de promover mudanças estruturais profundas e contribuindo para o encerramento progressivo dos períodos mais sensíveis do desenvolvimento.

Neurotransmissores e fatores neurotróficos

Os neurotransmissores desempenham papel essencial na modulação da plasticidade cerebral. Entre eles, a dopamina destaca-se por sua participação na aprendizagem, memória, flexibilidade cognitiva e controle executivo. Segundo Murty et al. (2016), esse neurotransmissor exerce influência decisiva sobre as conexões entre hipocampo e córtex pré-frontal, contribuindo para a consolidação das redes neurais responsáveis por funções cognitivas superiores.

A dopamina, particularmente o aumento de sua sinalização durante a adolescência, resulta em maior busca por novidades e comportamentos exploratórios. Para além da busca por informações, modelos animais demonstraram que a dopamina intensifica a codificação da memória episódica e estabiliza representações ativas na memória de longo prazo. Mais recentemente, pesquisas em humanos demonstraram que as interações entre os sistemas dopaminérgicos mesolímbicos e o hipocampo fortalecem a codificação da memória associativa, resultando em representações mais ricas das experiências prévias. Esses achados sugerem que o aumento da sinalização dopaminérgica durante a adolescência amplia, de forma independente, tanto a quantidade de experiências armazenadas na memória de longo prazo quanto a fidelidade das representações recuperadas durante comportamentos orientados a objetivos (Murty et al., 2016, p. 54).

Paralelamente, os fatores neurotróficos exercem importante função na manutenção e reorganização dos circuitos cerebrais. Dincheva et al. (2016) destacam que o fator neurotrófico derivado do cérebro (BDNF⁹) promove sobrevivência neuronal, diferenciação celular e fortalecimento sináptico. Em contrapartida, sua forma precursora, denominada proBDNF¹⁰, participa da remodelação estrutural e da eliminação seletiva de conexões neurais.

A atuação equilibrada dessas moléculas permite que o cérebro mantenha sua capacidade adaptativa, favorecendo processos de aprendizagem e memória sem comprometer a estabilidade funcional dos circuitos neurais.

Mecanismos epigenéticos e neuroimunes

Além dos neurotransmissores e fatores neurotróficos, a neuroplasticidade depende da atuação de mecanismos epigenéticos e neuroimunes que regulam a expressão gênica associada ao desenvolvimento cerebral. Conforme Crews et al. (2019) e Sicher et al. (2022), células como micróglia e astrócitos¹¹ participam ativamente da modulação dos processos envolvidos na formação e manutenção das conexões neurais.

Segundo os autores, essas células interagem com enzimas epigenéticas¹² responsáveis por regular a abertura ou condensação da cromatina, influenciando a ativação ou o silenciamento de genes relacionados à plasticidade neural. Alterações nesses mecanismos podem favorecer ou

⁹ **BDNF (Brain-Derived Neurotrophic Factor):** fator neurotrófico derivado do cérebro que estimula a sobrevivência neuronal, a formação de novas conexões sinápticas, a neuroplasticidade e os processos de aprendizagem e memória.

¹⁰ **proBDNF:** forma precursora do BDNF que participa da remodelação das conexões neurais e da eliminação seletiva de sinapses durante o desenvolvimento e a adaptação do sistema nervoso.

¹¹ **Micróglia e astrócitos:** a micróglia é composta por células imunológicas residentes do sistema nervoso central; os astrócitos são células gliais que fornecem suporte metabólico e funcional aos neurônios.

¹² **Enzimas epigenéticas:** as enzimas epigenéticas regulam a ativação ou o silenciamento de genes envolvidos no desenvolvimento e funcionamento cerebral.

comprometer processos relacionados à aprendizagem, memória e adaptação comportamental.

Essas evidências demonstram que a neuroplasticidade não depende exclusivamente da atividade neuronal, mas resulta da interação entre fatores celulares, moleculares, genéticos e ambientais que atuam de forma integrada na construção e reorganização do cérebro ao longo do desenvolvimento.

Fatores moleculares e sistemas reguladores da plasticidade cerebral

A plasticidade cerebral não depende apenas de processos estruturais amplos, como a formação e o refinamento das conexões neurais, mas também de sistemas moleculares e mecanismos reguladores que atuam de forma decisiva na manutenção do equilíbrio funcional do sistema nervoso. Nesse contexto, a adaptação cerebral resulta da interação entre diferentes sistemas biológicos capazes de modular a excitabilidade neuronal, a comunicação sináptica e a expressão gênica, influenciando diretamente a aprendizagem, a memória, o comportamento emocional e a capacidade de adaptação ao ambiente. Entre esses sistemas, destacam-se o sistema endocanabinoide, os neurotransmissores, os fatores neurotróficos e os mecanismos epigenéticos, que participam ativamente da organização, consolidação e remodelação dos circuitos neurais. Assim, este subitem busca apresentar os principais fatores moleculares e sistemas reguladores envolvidos na neuroplasticidade, evidenciando como sua atuação integrada contribui para a estabilidade e, simultaneamente, para a flexibilidade adaptativa do cérebro ao longo do desenvolvimento.

Sistema endocanabinoide e desenvolvimento cerebral

Outro sistema biológico de grande relevância para a plasticidade neural corresponde ao sistema endocanabinoide¹³. Esse sistema participa da regulação de diversos processos relacionados ao desenvolvimento cerebral, à aprendizagem, à memória e às emoções.

¹³ **Sistema endocanabinoide:** sistema biológico de sinalização composto por receptores, moléculas sinalizadoras produzidas pelo próprio organismo (endocanabinoides) e enzimas responsáveis por sua síntese e degradação. Participa da regulação de funções como desenvolvimento cerebral, memória, aprendizagem, emoções, percepção da dor, apetite e resposta ao estresse.

Conforme Dow-Edwards et al. (2019), os receptores canabinoides do tipo 1¹⁴ participam ativamente do refinamento das conexões neurais em desenvolvimento, regulando a transmissão glutamatérgica e GABAérgica¹⁵. Esses mecanismos contribuem para o equilíbrio entre excitação e inibição neural, condição indispensável para o adequado amadurecimento dos circuitos cerebrais.

A atuação desse sistema demonstra que a plasticidade cerebral resulta da interação entre múltiplos mecanismos biológicos responsáveis pela manutenção da estabilidade funcional e pela capacidade adaptativa do sistema nervoso.

Fatores moleculares da plasticidade cerebral

No âmbito molecular, a plasticidade cerebral depende da ação integrada de fatores neurotróficos, neurotransmissores e mecanismos epigenéticos. Conforme Dincheva et al. (2016), o BDNF promove sobrevivência neuronal, diferenciação celular e fortalecimento sináptico, enquanto sua forma precursora participa da remodelação estrutural e da eliminação seletiva de conexões neurais.

De maneira complementar, Murty et al. (2016) ressaltam a importância da dopamina para a consolidação das redes neurais relacionadas à memória, à flexibilidade cognitiva e ao controle executivo. A atuação desse neurotransmissor influencia diretamente a eficiência dos processos de aprendizagem e adaptação comportamental.

Para além de sustentar o processamento de informações entre o córtex pré-frontal e o hipocampo, sabe-se que a dopamina exerce papel central na plasticidade neural, estabilizando a integração de redes neurais distintas até a vida adulta. Uma longa tradição de pesquisas demonstra que a sinalização dopaminérgica está implicada tanto na aprendizagem quanto na plasticidade. Estudos em modelos animais evidenciaram que a potenciação de longo prazo no hipocampo, marcador celular da plasticidade dependente da experiência, é mediada pela dopamina. De forma mais específica, investigações experimentais demonstraram que a plasticidade entre os circuitos hipocampo-córtex pré-frontal é diretamente modulada pela neuromodulação dopaminérgica (Murty et al., 2016, p. 54).

¹⁴ **Receptores canabinoides do tipo 1:** proteínas localizadas principalmente no sistema nervoso central que fazem parte do sistema endocanabinoide. Sua ativação modula a liberação de neurotransmissores e influencia processos relacionados à plasticidade neural, aprendizagem, memória, comportamento emocional e desenvolvimento cerebral.

¹⁵ **Transmissão glutamatérgica e GABAérgica:** refere-se à comunicação entre neurônios mediada pelos neurotransmissores glutamato e GABA (ácido gama-aminobutírico). O glutamato é o principal neurotransmissor excitatório do cérebro, favorecendo a ativação neuronal, enquanto o GABA é o principal neurotransmissor inibitório, contribuindo para o controle da excitabilidade neural e para o equilíbrio funcional dos circuitos cerebrais. A interação entre esses dois sistemas é essencial para o desenvolvimento, a aprendizagem e a estabilidade das redes neurais.

Além disso, Crews et al. (2019) e Sicher et al. (2022) demonstram que mecanismos epigenéticos regulam a expressão de genes envolvidos na plasticidade cerebral. Segundo os autores, modificações em enzimas reguladoras da cromatina¹⁶ podem favorecer ou comprometer processos relacionados à aprendizagem, memória e adaptação comportamental, evidenciando que as experiências vivenciadas ao longo da vida possuem capacidade de influenciar a atividade genética sem alterar a sequência do DNA.

Essas evidências demonstram que a neuroplasticidade resulta da interação contínua entre fatores moleculares, celulares, comportamentais e ambientais, os quais atuam de forma integrada na construção e reorganização dos circuitos neurais ao longo de todo o ciclo vital.

DESENVOLVIMENTO CEREBRAL NAS DIFERENTES FASES DO CICLO VITAL

O cérebro humano desenvolve-se em uma trajetória marcada por sucessivas reorganizações, nas quais cada etapa da vida apresenta demandas e possibilidades próprias. Nesse percurso, a plasticidade neural atua como elemento essencial, permitindo ajustes contínuos que sustentam a aquisição de habilidades cognitivas, emocionais e sociais e tornam possível a adaptação às diferentes experiências vividas. Nesse sentido, este item apresenta uma análise das principais etapas do desenvolvimento cerebral, iniciando pela primeira infância, período em que se estabelecem as bases neurais e socioemocionais por meio das experiências de cuidado, apego e estimulação ambiental. Em seguida, aborda-se a infância intermediária como fase de refinamento neural e consolidação das funções executivas, com destaque para a mielinização e o amadurecimento do córtex pré-frontal. Posteriormente, examina-se a adolescência como etapa de intensa reorganização cerebral, marcada pela influência hormonal, pela consolidação de competências cognitivas superiores e pelo amadurecimento emocional e social. Por fim, o item amplia essa compreensão ao discutir a permanência da neuroplasticidade para além da adolescência, evidenciando que o cérebro mantém sua capacidade de adaptação e reorganização ao longo da vida. Dessa forma, este item oferece ao leitor uma visão cronológica e integrada das transformações cerebrais que fundamentam a construção das competências humanas em suas

¹⁶ **Cromatina:** complexo formado por moléculas de DNA associadas a proteínas, principalmente histonas, localizado no núcleo das células. Sua principal função é organizar e compactar o material genético, regulando também quais genes podem ser ativados ou silenciados em determinado momento. Modificações na estrutura da cromatina constituem importantes mecanismos epigenéticos, permitindo que fatores ambientais, experiências e estímulos influenciem a expressão gênica sem alterar a sequência do DNA.

diferentes dimensões.

Primeira infância: construção das bases neurais e socioemocionais

A primeira infância representa um período decisivo para a organização inicial do cérebro, pois é nessa fase que se estabelecem as bases estruturais e funcionais que sustentarão o desenvolvimento futuro. Caracterizada por intensa plasticidade neural, essa etapa concentra processos acelerados de formação sináptica, mielinização e amadurecimento de circuitos relacionados à cognição, às emoções e às interações sociais. Ao mesmo tempo, trata-se de um período de elevada sensibilidade às influências do ambiente, no qual experiências de cuidado, vínculos afetivos, estimulação adequada e condições de vida exercem profunda influência sobre a arquitetura cerebral. Nesse contexto, este subitem examina como a primeira infância constitui uma janela privilegiada para a construção das bases neurais e socioemocionais, evidenciando tanto seu potencial para promover trajetórias adaptativas quanto sua vulnerabilidade diante de experiências adversas.

Primeira infância como janela de oportunidade

A primeira infância constitui um dos períodos mais importantes para o desenvolvimento cerebral humano, caracterizando-se por intensa atividade neurobiológica e elevada capacidade de adaptação às influências ambientais. Nessa fase, o cérebro apresenta extraordinária plasticidade, favorecendo a formação acelerada de conexões sinápticas, a expansão das arborizações dendríticas e o aprimoramento progressivo dos sistemas neurais responsáveis pela cognição, pela regulação emocional e pelo comportamento social (Crespi et al., 2020).

Segundo Britto et al. (2017), os primeiros anos de vida representam uma importante janela de oportunidade para intervenções preventivas e promotoras do desenvolvimento. Durante esse período, os circuitos neurais encontram-se particularmente receptivos aos estímulos provenientes do ambiente, permitindo que experiências positivas produzam benefícios duradouros sobre a aprendizagem, a adaptação comportamental e o desenvolvimento socioemocional. Em consonância com essa perspectiva, Black et al. (2017) destacam que intervenções realizadas precocemente apresentam maior potencial para favorecer trajetórias positivas de desenvolvimento, em razão da elevada plasticidade observada nessa fase.

Nessa perspectiva, programas voltados à promoção da estimulação cognitiva, do enriquecimento ambiental, da nutrição adequada e do fortalecimento dos vínculos afetivos apresentam elevada capacidade de influenciar positivamente a organização cerebral. A plasticidade característica da primeira infância possibilita que experiências adequadas sejam incorporadas à arquitetura neural, fortalecendo circuitos relacionados às funções cognitivas, emocionais e sociais que servirão de base para etapas posteriores do desenvolvimento.

Cuidado responsivo, apego e desenvolvimento cerebral

Além dos fatores biológicos, a qualidade das experiências relacionais desempenha papel central na organização do cérebro infantil. Conforme Britto et al. (2017), a primeira infância caracteriza-se por intensa organização estrutural e funcional dos circuitos neurais, sendo as experiências precoces determinantes para a formação dos sistemas relacionados à aprendizagem, à memória e à adaptação comportamental. Nesse contexto, o cuidado responsivo, as interações afetivas e a qualidade do ambiente constituem elementos primordiais para a consolidação das redes neurais responsáveis pelo desenvolvimento cognitivo, emocional e social.

O cérebro evoluiu para adaptar-se em resposta a uma ampla gama de experiências precoces, o que favorece a rápida aquisição da linguagem, de habilidades cognitivas e de competências socioemocionais. O cuidado responsivo media o desenvolvimento de regiões cerebrais fundamentais e promove adaptações desenvolvimentais essenciais. Esses processos produzem benefícios ao longo de toda a vida da criança, incluindo maior capacidade de aprender, melhor desempenho escolar, maior participação social e melhor qualidade de vida (Britto et al., 2017, p. 91).

As evidências demonstram que as relações estabelecidas entre a criança e seus cuidadores atuam como importantes moduladores da plasticidade cerebral. Segundo Nelson et al. (2019), experiências precoces positivas favorecem trajetórias mais adaptativas de desenvolvimento cerebral, enquanto ambientes marcados por privação psicossocial podem comprometer processos essenciais de organização neural. Dessa forma, o cérebro infantil não se desenvolve de maneira isolada, mas em constante interação com o contexto social e afetivo no qual está inserido.

De maneira complementar, Leisman et al. (2025) ressaltam que experiências responsivas de cuidado favorecem a maturação dos circuitos neurais relacionados à regulação emocional,

especialmente aqueles que envolvem a amígdala¹⁷ e o córtex pré-frontal¹⁸. Segundo os autores, essas interações fortalecem mecanismos associados ao apego, à expressão emocional e à autorregulação, contribuindo para a formação de repertórios emocionais mais adaptativos. Em contrapartida, experiências caracterizadas por negligência, instabilidade ou ausência de suporte emocional aumentam significativamente a vulnerabilidade a dificuldades emocionais futuras.

Pobreza, negligência e privação psicossocial

Embora a elevada plasticidade da primeira infância represente uma oportunidade para a promoção do desenvolvimento, ela também aumenta a sensibilidade do cérebro aos efeitos de experiências adversas. Nesse contexto, fatores como pobreza, negligência, privação psicossocial e precariedade ambiental podem comprometer significativamente os processos de maturação neural. Segundo Santana et al. (2024), o desenvolvimento neuropsicomotor depende simultaneamente da maturação biológica e da qualidade dos estímulos oferecidos pelo ambiente. Os autores destacam que condições socioeconômicas desfavoráveis, baixa escolaridade parental, reduzida estimulação social e ambientes pouco enriquecidos podem limitar oportunidades determinantes para a aprendizagem e o desenvolvimento infantil.

[...] o desenvolvimento neuropsicomotor infantil como um processo de dinamismo progressivo influencia na aquisição de habilidades físicas, sociais, emocionais e cognitivas. Sabe-se que é avaliado pela faixa etária e que depende diretamente da maturação do sistema nervoso central e da estimulação pelo meio ambiente em que a criança está inserida, sendo avaliado nos campos da motricidade (ampla e fina), cognitivo e psicossocial. Entretanto, destaca-se que fatores de riscos biológicos, como a prematuridade, baixo peso, morbidades e história clínica (internações e permanência na unidade de terapia intensiva) dificultam o processo de evolução neuropsicomotor infantil de forma contínua (Santana et al., 2024, p. 2).

Em consonância com essa interpretação, Fernandes et al. (2019) verificaram que a exposição prolongada à pobreza extrema, à negligência e à privação de cuidados básicos está associada à redução do volume de substância cinzenta em regiões do lobo frontal responsáveis pela atenção, pelo controle comportamental e pelas funções executivas. Tais alterações podem repercutir sobre a capacidade de planejamento, autocontrole e adaptação ao longo da vida.

¹⁷ **Amígdala:** estrutura do sistema límbico localizada no lobo temporal medial, responsável pela detecção de estímulos emocionalmente relevantes, especialmente aqueles relacionados ao medo, à ameaça e à aprendizagem emocional.

¹⁸ **Córtex pré-frontal:** região localizada na porção anterior dos lobos frontais, responsável por funções executivas como planejamento, tomada de decisão, autocontrole, memória de trabalho, atenção e regulação emocional.

De maneira semelhante, Nelson et al. (2019) demonstram que experiências precoces de privação psicossocial podem comprometer o desenvolvimento de circuitos neurais relacionados à cognição, à memória, à regulação emocional e ao comportamento adaptativo. Os autores observaram alterações persistentes em estruturas cerebrais como hipocampo, amígdala e córtex pré-frontal, evidenciando que a ausência de estímulos adequados durante períodos de elevada plasticidade pode produzir repercussões duradouras.

Esses achados reforçam a importância da primeira infância como fase decisiva para a promoção do desenvolvimento humano, evidenciando que a qualidade das experiências oferecidas nesse período influencia profundamente a organização dos circuitos neurais e a construção das competências cognitivas, emocionais e sociais.

Infância intermediária e maturação das funções executivas

A infância intermediária corresponde a uma etapa de consolidação e especialização dos circuitos neurais formados nos primeiros anos de vida, marcada pelo aprimoramento progressivo das funções executivas. Nessa fase, o desenvolvimento cerebral passa a depender menos da criação acelerada de novas conexões e mais do refinamento das redes já estabelecidas, por meio de processos como mielinização e poda sináptica. Esse período favorece o fortalecimento de habilidades como atenção, memória de trabalho, controle inibitório, planejamento e resolução de problemas, essenciais para a adaptação às demandas escolares e sociais cada vez mais complexas. Assim, este subitem analisa como a infância intermediária representa um momento estratégico para o amadurecimento do córtex pré-frontal e para a consolidação das competências cognitivas que servirão de base para os desafios da adolescência e da vida adulta.

Mielinização e refinamento neural

Após os intensos processos de crescimento observados na primeira infância, o desenvolvimento cerebral ingressa em uma fase marcada pelo refinamento progressivo das conexões neurais. Durante a infância intermediária, a organização do sistema nervoso passa a depender menos da formação acelerada de novas conexões e mais da especialização e otimização dos circuitos previamente estabelecidos. Nesse contexto, mecanismos como a mielinização contínua e a poda sináptica assumem papel central na maturação cerebral.

Segundo Tau et al. (2010), o desenvolvimento das funções executivas segue uma trajetória prolongada, que se estende por muitos anos e depende da interação entre processos progressivos e regressivos. Entre os processos progressivos destaca-se a mielinização, responsável pelo aumento da velocidade e da eficiência da transmissão dos impulsos nervosos. Paralelamente, ocorrem processos regressivos altamente especializados, como a poda sináptica, que promove a eliminação seletiva de conexões pouco utilizadas.

Longe de representar perda funcional, a poda sináptica constitui um mecanismo essencial para o aprimoramento da circuitaria neural. Ao eliminar conexões redundantes ou menos eficientes, o cérebro reduz custos metabólicos e aumenta a eficiência do processamento das informações. Dessa maneira, os circuitos neurais tornam-se progressivamente mais especializados, favorecendo o desempenho cognitivo e comportamental.

Desenvolvimento do córtex pré-frontal

Entre as regiões cerebrais que apresentam desenvolvimento mais prolongado destaca-se o córtex pré-frontal, estrutura responsável por funções executivas como planejamento, memória de trabalho, controle inibitório, monitoramento comportamental e tomada de decisão. Conforme Selemon (2013), o amadurecimento dessa região depende diretamente dos processos de refinamento sináptico que ocorrem ao longo da infância e adolescência.

A autora destaca que a eliminação progressiva de conexões excitatórias pouco utilizadas favorece a consolidação das redes neurais responsáveis pela organização do comportamento orientado a objetivos. Como consequência, o cérebro passa gradualmente de uma arquitetura caracterizada por elevada redundância para uma organização mais eficiente e especializada.

Esse processo de especialização permite o desenvolvimento de habilidades determinantes para a adaptação ao ambiente, incluindo a capacidade de planejar ações futuras, controlar impulsos, resolver problemas complexos e ajustar comportamentos de acordo com demandas contextuais. Assim, a infância intermediária representa um período importante para a consolidação das bases neurais que sustentarão o funcionamento executivo durante a adolescência e a vida adulta.

Adolescência: reorganização cerebral e maturação socioemocional

A adolescência constitui uma fase singular do desenvolvimento humano, marcada por intensos processos de reorganização neural que repercutem diretamente sobre a cognição, as emoções e as relações sociais. Nesse período, o cérebro passa por um importante refinamento estrutural e funcional, no qual a integração entre áreas responsáveis pelo controle executivo e sistemas emocionais ainda se encontra em consolidação. Paralelamente, as transformações hormonais da puberdade influenciam a remodelação dos circuitos neurais, ampliando tanto as possibilidades de aprendizagem e adaptação quanto a sensibilidade às experiências ambientais. Nesse contexto, este subitem examina a adolescência como uma etapa de transição neurobiológica decisiva, na qual se intensificam os processos de amadurecimento cognitivo, regulação emocional e construção das competências sociais que terão impacto duradouro na vida adulta.

Transformações estruturais do cérebro adolescente

A adolescência corresponde a uma das fases mais intensas de reorganização cerebral observadas ao longo do ciclo vital. Embora o crescimento acelerado característico da infância tenha sido concluído, o cérebro adolescente passa por profundas transformações estruturais e funcionais que influenciam diretamente o desenvolvimento cognitivo, emocional e social.

Segundo Blakemore et al. (2006), essa etapa caracteriza-se pela redução progressiva da substância cinzenta associada ao refinamento das conexões neurais e pelo aumento contínuo da substância branca decorrente da mielinização axonal. Esses processos favorecem maior integração entre diferentes regiões cerebrais e aumentam a velocidade de processamento das informações.

Assim, em vez de uma simples mudança linear da substância cinzenta com a idade, os estudos sugerem uma perturbação no desenvolvimento da densidade da substância cinzenta que coincide, em grande medida, com o início da puberdade. Na puberdade, o volume de substância cinzenta no lobo frontal atinge um pico, seguido por uma fase de estabilidade após a puberdade e, posteriormente, por um declínio ao longo da adolescência, prolongando-se até o início da vida adulta (Blakemore et al., 2006, p. 299).

A diminuição gradual da densidade da substância cinzenta que ocorre após a puberdade em determinadas regiões cerebrais tem sido atribuída ao processo de poda sináptica pós-puberal. Em outras palavras, o aumento da substância cinzenta na puberdade reflete um

aumento repentino no número de sinapses. Em algum momento após a puberdade, ocorre um processo de refinamento, no qual essas sinapses excedentes são eliminadas (Blakemore et al., 2006, p. 300)

Em consonância com essa perspectiva, Paus (2005) destaca que o crescimento da substância branca promove comunicação mais eficiente entre os circuitos neurais, favorecendo o desenvolvimento do raciocínio abstrato, da memória de trabalho, da resolução de problemas complexos e do controle comportamental. Dessa forma, a adolescência deve ser compreendida não apenas como uma fase de transição social, mas como um período de profunda reorganização neurobiológica.

Puberdade, hormônios e remodelação neural

As transformações cerebrais observadas durante a adolescência estão intimamente relacionadas às alterações hormonais que acompanham a puberdade. Conforme Juraska et al. (2017), essa fase constitui uma etapa crítica para o amadurecimento cerebral, uma vez que os hormônios sexuais participam ativamente da remodelação dos circuitos neurais.

Segundo os autores, as alterações hormonais influenciam processos determinantes como redução da substância cinzenta, aumento da mielinização e aprimoramento do controle inibitório. De maneira semelhante, Vigil et al. (2011) ressaltam que hormônios esteroides gonadais¹⁹, incluindo testosterona²⁰, estrogênio e progesterona, participam diretamente de fenômenos biológicos relacionados à apoptose programada²¹, remodelação dendrítica²², mielinização e poda neural²³.

Nessa mesma direção, Schulz et al. (2016) argumentam que os hormônios puberais²⁴ não

¹⁹ **Hormônios esteroides gonadais:** hormônios produzidos principalmente pelas gônadas (ovários e testículos), derivados do colesterol, que desempenham papel fundamental no desenvolvimento sexual, na reprodução e na modulação do desenvolvimento cerebral e do comportamento.

²⁰ **Testosterona:** principal hormônio sexual masculino, produzido predominantemente pelos testículos, responsável pelo desenvolvimento das características sexuais secundárias e por influenciar processos relacionados à cognição, motivação, comportamento social e maturação cerebral.

²¹ **Apoptose programada:** processo biológico de morte celular controlada e geneticamente regulada, essencial para a eliminação de células desnecessárias ou danificadas durante o desenvolvimento e a manutenção dos tecidos.

²² **Remodelação dendrítica:** processo de modificação estrutural dos dendritos, prolongamentos dos neurônios responsáveis pela recepção de sinais nervosos, permitindo a reorganização das conexões neurais em resposta às experiências e à aprendizagem.

²³ **Poda neural:** processo de eliminação seletiva de conexões sinápticas pouco utilizadas, tornando os circuitos neurais mais eficientes e especializados durante o desenvolvimento cerebral.

²⁴ **Hormônios puberais:** conjunto de hormônios cuja produção aumenta significativamente durante a puberdade, promovendo mudanças físicas, emocionais, cognitivas e comportamentais associadas à maturação sexual.

apenas acompanham o desenvolvimento cerebral, mas atuam como importantes organizadores da arquitetura neural adolescente. Os autores destacam que mecanismos como neurogênese, remodelação sináptica e reorganização dos circuitos emocionais e sociais sofrem forte influência das alterações hormonais próprias desse período.

Além disso, Bray et al. (2024) demonstram que hormônios como estradiol e progesterona²⁵ influenciam diretamente o processamento emocional, as respostas ao estresse e a vulnerabilidade ao desenvolvimento de transtornos de ansiedade. Dessa forma, os fatores biológicos e psicossociais tornam-se inseparáveis na compreensão do desenvolvimento adolescente.

Consolidação das funções cognitivas

A adolescência também representa um período particularmente importante para a consolidação das funções cognitivas superiores. Conforme Murty et al. (2016), ocorre fortalecimento progressivo das conexões entre hipocampo e córtex pré-frontal, permitindo integração mais eficiente entre memória, aprendizagem e tomada de decisão.

[...] o refinamento da função executiva durante a adolescência resulta, em parte, da capacidade de melhor incorporar experiências anteriores em respostas relevantes para a tarefa. Embora esses processos estejam presentes ao longo do desenvolvimento, o pico relativo de maturação dos sistemas pré-frontal e hipocampal permite, presumivelmente, o fortalecimento da integração entre hipocampo e córtex pré-frontal (HPC-PFC). Além disso, propomos que essa integração facilita a incorporação de experiências anteriores relevantes na função executiva (Murty et al., 2016, p. 47–48).

Segundo os autores, o fortalecimento dessas vias neurais possibilita que experiências passadas sejam utilizadas de forma mais eficiente para orientar comportamentos futuros. Como resultado, observa-se aprimoramento gradual do planejamento, da aprendizagem adaptativa, da memória episódica e da capacidade de resolução de problemas complexos.

Essas transformações contribuem para o desenvolvimento de competências cognitivas cada vez mais sofisticadas, favorecendo a autonomia e a capacidade de adaptação diante das demandas crescentes da vida social e acadêmica.

²⁵ **Estradiol e progesterona:** o estradiol é a principal forma biologicamente ativa do estrogênio. Juntamente com a progesterona, participa da maturação cerebral, da regulação emocional, da cognição e da adaptação ao estresse.

Desenvolvimento emocional e social

Paralelamente às mudanças cognitivas, a adolescência constitui uma fase decisiva para a maturação dos sistemas envolvidos na regulação emocional. Segundo Silvers (2022), a capacidade de monitorar, avaliar e modificar estados emocionais continua em aperfeiçoamento durante toda essa etapa, acompanhando o fortalecimento progressivo das conexões entre o córtex pré-frontal e estruturas límbicas²⁶, especialmente a amígdala.

Nessa perspectiva, a intensidade emocional frequentemente observada durante a adolescência não deve ser interpretada como sinal de disfunção, mas como reflexo de um sistema neural que ainda se encontra em processo de integração funcional. À medida que as conexões entre regiões cognitivas e emocionais se tornam mais eficientes, ocorre aprimoramento gradual dos mecanismos de autorregulação e adaptação emocional.

O desenvolvimento emocional também está intimamente relacionado à construção das competências sociais. Conforme Kirkland et al. (2024), a poda sináptica mediada pela micróglia exerce papel relevante na organização dos comportamentos sociais durante a adolescência. Alterações nesse processo podem influenciar de forma duradoura a qualidade das interações interpessoais, demonstrando que a plasticidade neural participa não apenas da construção das competências cognitivas, mas também da formação das habilidades socioemocionais.

Durante a adolescência, a paisagem sináptica do núcleo accumbens (NAc) passa por um período de plasticidade neuroimune [...] coincidindo com um pico e posterior declínio das brincadeiras sociais [...]. Nossos dados sugerem que, embora a consequência de curto prazo da poda no NAc em momentos específicos para cada sexo apresente um fenótipo comportamental convergente (aumento das brincadeiras), a programação de longo prazo do cérebro social torna-se refinada de maneira específica entre os sexos (Kirkland et al., 2024, p. 8–9).

De acordo com Dow-Edwards et al. (2019), a adolescência representa simultaneamente um período de extraordinária oportunidade e elevada vulnerabilidade. A intensa plasticidade que favorece o refinamento cognitivo e emocional também aumenta a suscetibilidade às influências ambientais. Consequentemente, experiências positivas podem produzir benefícios duradouros para o desenvolvimento, enquanto experiências adversas podem comprometer trajetórias cognitivas, emocionais e sociais futuras.

²⁶ **Estruturas límbicas:** conjunto de regiões cerebrais envolvidas no processamento das emoções, motivação, memória e respostas ao estresse, incluindo a amígdala, o hipocampo e partes do hipotálamo.

Neuroplasticidade além da adolescência

Durante muito tempo, predominou na literatura científica a concepção de que a plasticidade cerebral estaria restrita à infância e à adolescência, reduzindo-se significativamente após o término dessas fases do desenvolvimento. Entretanto, os avanços das neurociências nas últimas décadas têm demonstrado que o cérebro mantém capacidade de adaptação estrutural e funcional ao longo de toda a vida, ainda que em intensidade variável conforme a idade e as condições ambientais (Lopes, 2020; Oliveira et al., 2019).

Embora os períodos iniciais do desenvolvimento sejam caracterizados por maior sensibilidade às influências ambientais, os mecanismos de reorganização neural permanecem ativos durante a vida adulta. Processos como formação de novas conexões sinápticas, remodelação dendrítica, alterações na eficiência das redes neurais e neurogênese em regiões específicas continuam contribuindo para a aprendizagem, a memória e a adaptação comportamental (Ramsaran et al., 2019; Oliveira et al., 2019).

Nesse contexto, a plasticidade cerebral possibilita a aquisição de novos conhecimentos, o desenvolvimento de habilidades complexas e a adaptação a mudanças ambientais, profissionais e sociais. Conforme Oliveira et al. (2019), a aprendizagem contínua produz modificações estruturais mensuráveis no cérebro adulto, evidenciando que a experiência permanece como importante agente de transformação neural ao longo da vida.

Tudo que provém do ambiente e interage com o nosso sistema nervoso deixa alguma marca nele, o modifica de alguma forma. Esta mudança acontece em todos os momentos da vida, por ser uma característica marcante e permanente do sistema neural, possui momentos onde essa plasticidade é mais propícia, chamado “período crítico”, ocorrido durante a ontogênese humana (Oliveira et al., 2019, p. 178).

Além disso, fatores como atividade física, qualidade do sono, estimulação cognitiva, interação social e participação em atividades intelectualmente desafiadoras contribuem para a manutenção da plasticidade cerebral durante a vida adulta (Jing et al., 2024; Maski et al., 2013; Leisman et al., 2025). Tais evidências reforçam a compreensão de que o desenvolvimento cerebral não se encerra com o término da adolescência, mas continua sendo influenciado pelas experiências vivenciadas em diferentes etapas da vida.

Dessa forma, a neuroplasticidade deve ser compreendida como um processo contínuo que acompanha o indivíduo ao longo de todo o ciclo vital, permitindo adaptações permanentes diante das demandas cognitivas, emocionais e sociais impostas pelo ambiente.

JANELAS DE OPORTUNIDADE E FATORES MODULADORES DO DESENVOLVIMENTO CEREBRAL

O percurso do desenvolvimento cerebral é marcado por fases em que a capacidade de adaptação do sistema nervoso se torna mais intensa, tornando o cérebro especialmente receptivo às influências do ambiente e às experiências vividas. Esses momentos, conhecidos como janelas de oportunidade, representam fases estratégicas para a promoção de competências cognitivas, emocionais e sociais, ao mesmo tempo em que ampliam a vulnerabilidade aos efeitos de experiências adversas. Nesse contexto, este item aborda, inicialmente, a adolescência como uma importante fase de oportunidades e riscos, destacando seu potencial para intervenções promotoras do desenvolvimento e sua suscetibilidade ao estresse e às adversidades. Em seguida, discute os principais fatores moduladores da neuroplasticidade ao longo do ciclo vital, como sono, experiências de cuidado e atividade física, evidenciando sua influência sobre a aprendizagem, a memória e a regulação emocional. Por fim, o item examina os conceitos de períodos críticos e períodos sensíveis, analisando como a primeira infância e a adolescência configuram fases privilegiadas para a aquisição de funções básicas e superiores. Dessa forma, este item oferece ao leitor uma compreensão integrada sobre os momentos de maior receptividade do cérebro às experiências e os fatores que podem potencializar ou comprometer seu desenvolvimento.

Adolescência: oportunidades e vulnerabilidades

A adolescência configura-se como uma fase de intensa plasticidade cerebral, na qual os processos de reorganização neural ampliam significativamente tanto o potencial de desenvolvimento quanto a sensibilidade às influências do ambiente. Nesse período, o refinamento dos circuitos relacionados às funções executivas, à regulação emocional e à cognição social torna o cérebro particularmente receptivo a experiências capazes de favorecer aprendizagens, fortalecer habilidades adaptativas e consolidar competências socioemocionais. Contudo, essa mesma condição de elevada plasticidade também aumenta a vulnerabilidade aos efeitos de estressores, conflitos familiares, ambientes adversos e outras experiências negativas que podem interferir no curso do amadurecimento cerebral. Assim, este subitem examina a adolescência sob essa dupla perspectiva, como um período de amplas possibilidades para a

promoção do desenvolvimento e, simultaneamente, de elevada suscetibilidade a fatores de risco com repercussões duradouras.

Adolescência como segunda janela de oportunidade

A adolescência representa uma das mais importantes janelas de oportunidade para o desenvolvimento humano após a primeira infância. Embora as bases estruturais do cérebro tenham sido estabelecidas nos anos iniciais da vida, essa fase é marcada por intensa reorganização dos circuitos neurais relacionados às funções executivas, à cognição social e à regulação emocional. Em razão dessa elevada plasticidade, o cérebro adolescente apresenta notável capacidade de adaptação e reorganização em resposta às experiências vivenciadas.

Segundo Modabbernia et al. (2021), a adolescência constitui uma segunda grande janela de oportunidade para intervenções terapêuticas, educacionais e psicossociais. Diferentemente da primeira infância, caracterizada pela construção das bases estruturais do sistema nervoso, essa etapa está associada ao refinamento das redes neurais responsáveis pela autorregulação, tomada de decisão, flexibilidade cognitiva e adaptação emocional. Dessa maneira, intervenções direcionadas ao fortalecimento das competências cognitivas e socioemocionais apresentam elevado potencial para modificar trajetórias desenvolvimentais.

A adolescência representa uma janela de oportunidade em que intervenções direcionadas a indivíduos vulneráveis podem ser bem-sucedidas em modificar trajetórias de desenvolvimento em direção a desfechos mais positivos de saúde mental. [...] um conjunto de exposições relacionadas ao ambiente da vizinhança, às características parentais, à qualidade da vida familiar, ao histórico perinatal, à saúde cardiometabólica, à cognição e à psicopatologia, que apresentaram as associações mais consistentes com a organização cerebral [...] podem ser consideradas alvos prioritários para intervenções universais voltadas à promoção do bem-estar mental entre os jovens (Modabbernia et al., 2021, p. 9–10).

Em consonância com essa perspectiva, Black et al. (2017) ressaltam que os períodos sensíveis do desenvolvimento correspondem a momentos particularmente favoráveis para intervenções preventivas e promotoras da saúde, em virtude da elevada plasticidade observada nesses períodos. Durante a adolescência, ações voltadas ao fortalecimento da aprendizagem, da autorregulação emocional e das habilidades sociais podem produzir efeitos duradouros sobre o desenvolvimento.

Da mesma forma, Nelson et al. (2019) argumentam que estratégias destinadas à promoção da adaptação emocional e comportamental apresentam maior potencial de impacto quando implementadas durante períodos em que os circuitos neurais ainda se encontram em processo de reorganização e consolidação. Assim, a adolescência deve ser compreendida como uma fase estratégica para a promoção do desenvolvimento humano e para a prevenção de dificuldades futuras.

Estratégias promotoras de desenvolvimento

A elevada plasticidade observada durante a adolescência amplia a eficácia de intervenções destinadas ao fortalecimento das funções cognitivas e emocionais. Nesse contexto, práticas que favoreçam a atenção, a autorregulação e o enfrentamento adaptativo do estresse podem contribuir significativamente para o desenvolvimento saudável.

Conforme Black et al. (2017) e Modabbernia et al. (2021), a elevada plasticidade observada durante a adolescência amplia a capacidade de resposta do cérebro às experiências ambientais. Nesse contexto, experiências educacionais enriquecedoras, relações interpessoais positivas, ambientes familiares acolhedores e oportunidades de participação social podem favorecer o fortalecimento das redes neurais associadas à cognição social, ao autocontrole e à adaptação emocional. De maneira semelhante, Nelson et al. (2019) e Silvers (2022) destacam que experiências sociais positivas contribuem para o amadurecimento dos sistemas neurais envolvidos na regulação emocional e no comportamento adaptativo. Dessa forma, a adolescência configura-se como um período privilegiado para a construção de competências cognitivas, emocionais e sociais que favorecem o bem-estar e a adaptação ao longo da vida.

Estresse, adversidades e vulnerabilidades

A mesma plasticidade que possibilita adaptações positivas também pode amplificar os efeitos das experiências adversas. Em razão da intensa reorganização cerebral característica da adolescência, os circuitos neurais tornam-se particularmente sensíveis às influências ambientais, aumentando tanto o potencial de desenvolvimento quanto a vulnerabilidade aos fatores de risco.

Conforme Black et al. (2017), o amadurecimento cerebral ocorre de forma prolongada, sendo as regiões associadas às funções executivas e à autorregulação emocional especialmente

suscetíveis às influências ambientais durante a adolescência. Nesse período, a intensa reorganização neural associada à mielinização progressiva e ao refinamento das conexões sinápticas pode ampliar os efeitos do estresse crônico e de outras experiências adversas.

Evidências da neurociência documentaram associações entre baixo nível socioeconômico na infância e menor volume de substância cinzenta no hipocampo, bem como menor volume nos lobos frontal e temporal, fatores que podem mediar associações entre pobreza, baixo desempenho cognitivo, acadêmico e comportamental. Os efeitos de crescer em condições adversas podem estender-se até a vida adulta, resultando em menor ativação de regiões cerebrais associadas à linguagem, ao controle cognitivo e à memória, além de maior ativação de regiões relacionadas à reatividade emocional (Black et al., 2017, p. 80).

Nelson et al. (2019) ressaltam que experiências negativas vivenciadas durante fases de elevada plasticidade podem produzir alterações persistentes em circuitos neurais relacionados à cognição, às emoções e ao comportamento. De maneira semelhante, Selemon (2013) demonstra que mecanismos moleculares envolvidos na plasticidade sináptica apresentam janelas críticas de regulação durante a adolescência, podendo sofrer alterações duradouras em decorrência de influências ambientais negativas.

Segundo Sicher et al. (2022), a exposição prolongada ao estresse interfere diretamente nos processos de mielinização, poda sináptica e neurotransmissão que sustentam o amadurecimento cerebral. Como consequência, aumenta a vulnerabilidade a dificuldades cognitivas, emocionais e comportamentais, além de favorecer o desenvolvimento de transtornos psiquiátricos ao longo da vida.

Em consonância com esses achados, Thijssen et al. (2024) verificaram que experiências de conflito familiar, práticas parentais coercitivas e ambientes percebidos como ameaçadores estão associadas a alterações em circuitos neurais envolvendo a amígdala e regiões pré-frontais. Tais modificações podem influenciar negativamente trajetórias relacionadas à regulação emocional, à saúde mental e ao ajustamento psicossocial futuro.

Fatores moduladores da neuroplasticidade ao longo do ciclo vital

A capacidade plástica do cérebro, embora presente ao longo de toda a vida, não se mantém inalterada nem depende exclusivamente de mecanismos internos, sendo continuamente influenciada por fatores biológicos, comportamentais e relacionais que podem favorecer ou limitar seu potencial adaptativo. Nesse sentido, diferentes condições de vida atuam como

moduladores do desenvolvimento cerebral, interferindo diretamente na consolidação de circuitos neurais relacionados à aprendizagem, à memória, às emoções e ao comportamento social. Aspectos como a qualidade do sono, as experiências de cuidado e a prática de atividade física assumem papel relevante nesse processo, uma vez que participam da manutenção da integridade neural e da regulação de funções essenciais ao equilíbrio cognitivo e emocional. Assim, este subitem discute como esses fatores operam ao longo do ciclo vital, evidenciando sua importância na promoção de trajetórias mais adaptativas de desenvolvimento e saúde cerebral.

Sono e desenvolvimento cerebral

Entre os fatores que modulam a plasticidade cerebral ao longo da vida, a qualidade do sono ocupa posição de destaque. O sono participa de processos primordiais relacionados à consolidação da memória, à aprendizagem, à regulação emocional e à reorganização dos circuitos neurais.

Segundo Maski et al. (2013), a privação de sono durante a infância e a adolescência compromete estruturas cerebrais associadas às funções executivas, à atenção, à autorregulação emocional e ao desempenho acadêmico, incluindo o córtex pré-frontal, os gânglios da base e a amígdala. Esses achados evidenciam que o sono não deve ser compreendido apenas como um estado de repouso fisiológico, mas como um processo ativo de manutenção e reorganização cerebral.

Experiências de cuidado e regulação emocional

As experiências de cuidado constituem outro importante modulador da plasticidade cerebral. Desde os primeiros anos de vida, as interações estabelecidas com cuidadores influenciam diretamente a organização dos circuitos neurais relacionados às emoções e ao comportamento social.

Conforme Leisman et al. (2025), experiências responsivas de cuidado favorecem a maturação funcional da amígdala e do córtex pré-frontal, fortalecendo mecanismos associados ao apego, à expressão emocional e à autorregulação. Em contrapartida, experiências adversas aumentam significativamente a vulnerabilidade a dificuldades emocionais futuras.

As experiências precoces, especialmente o cuidado responsivo, moldam o desenvolvimento dos circuitos neurais envolvidos na expressão e na regulação emocional. O cuidado sensível promove a maturação adaptativa da amígdala e do córtex pré-frontal, enquanto experiências adversas, como negligência ou exposição crônica ao estresse, podem desorganizar esses circuitos e aumentar a vulnerabilidade a dificuldades emocionais futuras. (Leisman et al., 2025, p. 1).

Essas evidências reforçam a importância dos vínculos afetivos para a construção de trajetórias adaptativas de desenvolvimento, demonstrando que a qualidade das relações interpessoais influencia diretamente a organização dos sistemas neurais responsáveis pela saúde emocional.

Atividade física e plasticidade cerebral

Além dos fatores psicossociais, a neuroplasticidade é influenciada por condições biológicas e comportamentais que atuam ao longo de todo o ciclo vital. Entre elas, a atividade física destaca-se como um dos mais importantes moduladores positivos do desenvolvimento cerebral.

Segundo Jing et al. (2024), o exercício físico estimula processos de neurogênese, angiogênese e sinaptogênese, especialmente em regiões relacionadas à memória e à aprendizagem. Os autores destacam que a prática regular de atividade física favorece a formação e o fortalecimento de conexões neurais, estimulando mecanismos neurobiológicos associados à plasticidade cerebral.

Durante a primeira infância, a atividade física pode produzir um impacto favorável sobre o desenvolvimento cerebral por meio da serotonina, manifestando-se em funções cognitivas e habilidades socioemocionais. A neurogênese e a plasticidade sináptica moduladas pela serotonina emergem como eventos neurais fundamentais que contribuem para esse impacto (Jing et al., 2024, p. 39).

Além disso, a atividade física promove alterações neuroquímicas relacionadas à aprendizagem, memória e regulação emocional, contribuindo para a manutenção da plasticidade cerebral e para a proteção contra prejuízos cognitivos e emocionais ao longo da vida.

Janelas de oportunidade para a plasticidade cerebral

Ao longo do desenvolvimento humano, existem períodos em que o cérebro apresenta maior receptividade às experiências, tornando-se especialmente sensível aos estímulos ambientais e às condições de vida. Essas fases, denominadas janelas de oportunidade, correspondem a momentos em que a plasticidade neural alcança maior intensidade, favorecendo a aquisição e o aprimoramento de competências determinantes para a adaptação cognitiva, emocional e social. Entretanto, essa maior abertura ao aprendizado também implica maior sensibilidade à ausência de estímulos adequados ou à presença de experiências adversas. Nesse contexto, este subitem discute os conceitos de períodos críticos e períodos sensíveis, bem como analisa como a primeira infância e a adolescência se configuram como momentos estratégicos para o desenvolvimento de funções básicas e superiores, evidenciando a importância de intervenções oportunas para potencializar trajetórias mais saudáveis de desenvolvimento cerebral.

Conceitos de períodos críticos e períodos sensíveis

Um dos conceitos centrais para a compreensão da neuroplasticidade refere-se à existência de períodos do desenvolvimento em que o cérebro apresenta maior receptividade às influências ambientais. Esses períodos são frequentemente descritos na literatura como períodos críticos e períodos sensíveis, embora os termos não sejam sinônimos.

Segundo Hensch (2005 como citado Black et al., 2017), os períodos críticos correspondem a intervalos temporais relativamente restritos durante os quais determinadas experiências são indispensáveis para o desenvolvimento adequado de funções específicas. Na ausência desses estímulos, podem ocorrer prejuízos permanentes ou de difícil reversão.

O desenvolvimento inicial da criança é caracterizado por períodos sensíveis para o desenvolvimento de habilidades relacionadas à maturação e às interações genético-ambientais. O efeito das intervenções varia com base nesses períodos sensíveis, relacionados a experiências específicas ou a determinadas condições ambientais. [...] Em síntese, o período compreendido entre a concepção e os 2 anos de idade (1.000 dias) é sensível aos efeitos dos nutrientes sobre o crescimento infantil, a cognição e o desempenho escolar subsequente (Black et al., 2017, p. 81).

Os períodos sensíveis, por sua vez, apresentam limites temporais mais flexíveis. Conforme Knudsen (2004 como citado Black et al., 2017), representam fases em que determinadas experiências exercem influência particularmente intensa sobre a organização cerebral, embora a aprendizagem e a adaptação possam continuar ocorrendo posteriormente. Essa concepção é especialmente relevante para a compreensão do desenvolvimento humano, pois evidencia que diferentes competências apresentam graus distintos de sensibilidade às experiências ambientais.

Diferentemente dos períodos críticos, os períodos sensíveis correspondem a fases do desenvolvimento em que o cérebro apresenta maior receptividade a determinadas experiências, tornando essas influências particularmente eficazes para moldar circuitos neurais e funções comportamentais. Entretanto, ao contrário do que ocorre nos períodos críticos, a plasticidade não se encerra completamente após essa fase, permitindo que aprendizagens posteriores ainda ocorram, embora geralmente com menor eficiência. Essa distinção é central para compreender como diferentes domínios do desenvolvimento humano permanecem abertos à influência ambiental em graus variados ao longo do tempo (Black et al., 2017, p. 80).

Figura 9

Comparação entre períodos críticos e períodos sensíveis no desenvolvimento cerebral

CrITÉrio	Período crítico	Período sensível
Definição	Intervalo temporal restrito em que determinadas experiências são indispensáveis para o desenvolvimento normal de uma função específica.	Intervalo temporal de maior receptividade a determinadas experiências, sem exclusividade absoluta para sua ocorrência.
Flexibilidade temporal	Baixa, com início e término mais delimitados.	Maior flexibilidade, com limites menos rígidos.
Dependência da experiência	A experiência é essencial e insubstituível naquele momento.	A experiência é altamente relevante, mas não exclusiva daquele período.
Plasticidade cerebral	Elevadíssima e mais específica para determinadas funções.	Elevada, porém mais distribuída e prolongada.
Possibilidade de recuperação posterior	Limitada ou, em alguns casos, muito difícil.	Possível, embora com menor eficiência.
Consequências da privação	Pode gerar déficits permanentes ou de difícil reversão.	Pode gerar atrasos ou prejuízos, mas com maior potencial de compensação.
Exemplos clássicos	Desenvolvimento da visão binocular, audição e linguagem inicial.	Regulação emocional, funções executivas, habilidades sociais e aprendizagem complexa.
Relação com o ambiente	O ambiente atua como condição indispensável para ativação de circuitos específicos.	O ambiente intensifica e modula o refinamento de circuitos já em formação.
Implicações para intervenção	Exige atuação precoce e imediata.	Permite intervenções prolongadas e maior margem de adaptação.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de Black et al. (2017)

Conforme os autores, a distinção entre períodos críticos e sensíveis é central para compreender o neurodesenvolvimento, pois evidencia que nem todas as funções seguem a mesma lógica temporal de maturação. Enquanto algumas dependem de experiências em janelas muito específicas, outras permanecem mais abertas à influência ambiental ao longo de fases mais extensas do desenvolvimento.

Primeira infância: janela de oportunidade para funções básicas

A primeira infância corresponde ao período de maior sensibilidade do cérebro para a aquisição das funções básicas que sustentarão o desenvolvimento posterior. Nessa fase, a elevada plasticidade neural favorece a rápida organização de circuitos responsáveis pelo processamento sensorial, pela coordenação motora, pela vinculação afetiva e pela comunicação. Trata-se de um momento em que experiências simples, como o contato físico, a interação verbal, a exploração do ambiente e a responsividade dos cuidadores, exercem papel decisivo na consolidação dessas funções iniciais. Assim, este subitem examina como os primeiros anos de vida constituem uma janela estratégica para a construção dos sistemas sensoriais e motores, dos vínculos de apego e dos processos de linguagem, evidenciando que a qualidade dos estímulos recebidos nesse período influencia profundamente as bases cognitivas, emocionais e sociais do desenvolvimento humano.

Sistemas sensoriais e motores

A primeira infância constitui um período decisivo para a organização inicial de circuitos neurais determinantes para o desenvolvimento humano. Segundo Britto (2017), o cérebro adapta-se em resposta a uma ampla variedade de experiências precoces, dando origem a períodos sensíveis que favorecem a rápida aquisição da linguagem, de habilidades cognitivas e de competências socioemocionais. Nessa fase, a elevada plasticidade cerebral possibilita intensa reorganização neural, estabelecendo bases importantes para aprendizagens posteriores mais complexas, bem como para a adaptação progressiva ao ambiente.

Muito se aprendeu a partir de estudos com roedores e primatas não humanos nos quais a perda sensorial é induzida (por exemplo, quando o animal é privado de luz ou som) ou em que os animais são criados seletivamente (por exemplo, privados de ver faces). De forma semelhante, importantes evidências sobre como a ausência de experiência altera o desenvolvimento cerebral foram obtidas por meio do estudo de bebês humanos que sofreram perdas sensoriais precoces, como aqueles nascidos com catarata ou surdez,

e que posteriormente tiveram sua visão ou audição restauradas em diferentes momentos do desenvolvimento (Nelson et al., 2019, p. 1).

Dessa forma, a consolidação precoce das funções sensoriais e motoras não se limita ao desempenho imediato da criança, mas constitui o alicerce neurobiológico sobre o qual se estruturam competências cognitivas, emocionais e sociais mais complexas. Isso evidencia que a riqueza e a qualidade das experiências oferecidas nos primeiros anos de vida exercem influência decisiva sobre a trajetória global do desenvolvimento humano.

Apego, socialização e regulação do estresse

Além dos sistemas sensoriais, os primeiros anos de vida correspondem a um período particularmente importante para o desenvolvimento dos mecanismos de apego, socialização e regulação emocional. Conforme Nelson et al. (2019), experiências responsivas de cuidado favorecem a organização de circuitos neurais envolvidos no processamento emocional, na vinculação afetiva e na adaptação ao estresse. A qualidade das relações estabelecidas nessa fase influencia diretamente a construção dos sistemas biológicos responsáveis pela autorregulação emocional e pelo desenvolvimento socioemocional.

Segundo Nelson et al. (2019), a formação do apego seguro ao cuidador pode ser compreendida como um período sensível do desenvolvimento, no qual experiências de cuidado responsivo exercem influência decisiva sobre a organização de sistemas relacionados ao estresse, à atenção e ao apego. Os autores destacam ainda que a plasticidade neural que persiste após esse período permanece condicionada pelas experiências vividas nessa fase inicial, de modo que relações precoces de cuidado estabelecem limites e possibilidades para a adaptação emocional futura. Nesse sentido, experiências de privação ou negligência podem comprometer de forma duradoura a organização neural subjacente à autorregulação emocional e ao processamento social.

Dessa forma, as experiências relacionais precoces não apenas influenciam o bem-estar emocional imediato da criança, mas participam ativamente da construção da arquitetura cerebral que sustentará competências socioemocionais ao longo da vida. Isso evidencia que o vínculo afetivo, a responsividade e a estabilidade do cuidado constituem elementos centrais para a formação dos mecanismos de autorregulação, resiliência e adaptação social futura.

Linguagem e comunicação

A aquisição da linguagem também ocorre durante um período de elevada sensibilidade do desenvolvimento. Segundo Britto et al. (2017), a exposição precoce à comunicação verbal e às interações sociais estimula a formação de circuitos neurais especializados no processamento da linguagem. Quanto mais rica e frequente for a estimulação linguística durante os primeiros anos de vida, maiores tendem a ser os benefícios para o desenvolvimento da comunicação, da aprendizagem e das habilidades cognitivas.

O cérebro em desenvolvimento apresenta elevada sensibilidade às experiências precoces, ressalta Britto (2017), especialmente àquelas relacionadas à linguagem e às interações sociais. Nesse contexto, a exposição linguística constitui um elemento central para a organização de circuitos neurais envolvidos na comunicação, favorecendo a aquisição da linguagem e o desenvolvimento de habilidades cognitivas e socioemocionais. Essas experiências iniciais estabelecem bases importantes para aprendizagens posteriores e para a adaptação progressiva aos contextos escolares e sociais.

Assim, a linguagem não se configura apenas como instrumento de comunicação, mas como um dos principais organizadores do desenvolvimento cognitivo e social na infância. A riqueza das interações verbais nos primeiros anos amplia a capacidade de processamento simbólico, fortalece funções executivas e favorece a construção das bases neurais necessárias para aprendizagens progressivamente mais complexas.

Adolescência: janela de oportunidade para funções superiores

A adolescência representa um período singular para o aprimoramento das funções superiores do cérebro, em razão da intensa reorganização dos circuitos neurais que sustentam o pensamento abstrato, o controle cognitivo, a regulação emocional e a cognição social. Diferentemente da primeira infância, voltada à consolidação de funções básicas, essa etapa caracteriza-se pelo refinamento de habilidades mais complexas, essenciais para a autonomia e a adaptação às exigências da vida adulta. Nesse contexto, o fortalecimento das conexões entre o córtex pré-frontal, o hipocampo e as estruturas límbicas ampliam a capacidade de planejamento, tomada de decisão, flexibilidade cognitiva e autorregulação emocional. Assim, este subitem analisa a adolescência como uma janela estratégica para a consolidação das competências

cognitivas e socioemocionais superiores, ao mesmo tempo em que evidencia as vulnerabilidades inerentes a esse processo de amadurecimento neural ainda em curso.

Controle cognitivo e funções executivas

A adolescência representa uma importante janela de oportunidade para o fortalecimento das funções executivas e do controle cognitivo. Conforme Murty et al. (2016), o fortalecimento das conexões entre hipocampo e córtex pré-frontal favorece o desenvolvimento do planejamento, da memória de trabalho, da tomada de decisão e da flexibilidade cognitiva. Esses processos contribuem para a consolidação das competências necessárias à autonomia e à adaptação social.

Desenvolvimento emocional e social

Segundo Silvers (2022), a adolescência corresponde a uma fase crítica para a consolidação das habilidades de regulação emocional e cognição social. O fortalecimento das conexões entre regiões pré-frontais e estruturas límbicas possibilita respostas emocionais mais equilibradas e maior capacidade de compreensão das interações sociais. Essa reorganização cerebral favorece o desenvolvimento da identidade, das relações interpessoais e das competências socioemocionais.

Enquanto as crianças dependem fortemente de seus cuidadores para regular suas emoções, os adolescentes tornam-se progressivamente mais propensos a recorrer aos amigos ou a si próprios para realizar essa regulação. À medida que essa capacidade de autorregulação se desenvolve, também se modifica a forma como os adolescentes regulam suas emoções. Em consonância com a caracterização da adolescência como um período crítico para o desenvolvimento de processos cognitivos de ordem superior, os adolescentes passam a utilizar estratégias cognitivas de autorregulação com maior frequência e maior flexibilidade, favorecendo o aperfeiçoamento progressivo das competências emocionais e sociais (Silvers et al., 2022, p. 259–260).

Dessa forma, a adolescência consolida-se como um período de intensa reorganização dos sistemas emocionais e sociais, no qual a ampliação da autonomia psicológica e o refinamento dos circuitos pré-frontolímbicos favorecem maior capacidade de autorregulação e adaptação interpessoal. Esse processo constitui um dos fundamentos para a construção da identidade, da resiliência emocional e da competência social na vida adulta.

Vulnerabilidades associadas à elevada plasticidade

A elevada plasticidade característica da adolescência também amplia a sensibilidade aos fatores de risco. Conforme Dow-Edwards et al. (2019) e Sicher et al. (2022), experiências adversas, exposição ao estresse crônico, uso de substâncias psicoativas e ambientes desfavoráveis podem interferir nos processos de reorganização neural que ocorrem nesse período. Por essa razão, a adolescência deve ser compreendida simultaneamente como uma fase de oportunidade para o desenvolvimento e de vulnerabilidade a influências ambientais negativas.

Durante a adolescência, o cérebro apresenta uma vulnerabilidade singular a perturbações negativas. Tanto o consumo de álcool quanto a exposição ao estresse, ambos intensificados nesse período, podem alterar de forma individual e sinérgica as trajetórias do neurodesenvolvimento, influenciando sistemas de neurotransmissores e circuitos neurais em transformação. Essas interferências podem produzir efeitos persistentes sobre a estrutura cortical, a conectividade pré-frontal e os mecanismos de regulação comportamental e emocional (Sicher et al., 2022, p. 1).

Sob essa perspectiva, a adolescência revela-se como uma etapa de elevada plasticidade e intensa reorganização cerebral, na qual as experiências vividas podem atuar tanto como fatores de fortalecimento quanto de fragilização do desenvolvimento. A qualidade do ambiente, das relações e das escolhas comportamentais nesse período pode influenciar de forma decisiva a consolidação das funções executivas, da regulação emocional e da saúde mental futura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão de escopo permitiu mapear e sistematizar as evidências científicas relacionadas à neuroplasticidade e ao desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital, possibilitando compreender como mecanismos biológicos, janelas de oportunidade e fatores moduladores interagem na organização, reorganização e adaptação dos circuitos neurais. Os resultados encontrados permitem responder ao problema de pesquisa ao demonstrar que o desenvolvimento cerebral não decorre exclusivamente da programação genética, mas resulta de um processo dinâmico e contínuo de interação entre fatores biológicos, ambientais, comportamentais e socioculturais que atuam desde o período pré-natal até a vida adulta.

As evidências analisadas demonstram que a neuroplasticidade constitui o princípio organizador fundamental do desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital. Desde o período

pré-natal até a vida adulta, o cérebro passa por sucessivos processos de formação, fortalecimento, reorganização e refinamento dos circuitos neurais, permitindo a adaptação contínua às experiências e demandas ambientais. O desenvolvimento cerebral resulta da interação dinâmica entre predisposições genéticas, mecanismos moleculares, fatores hormonais, processos epigenéticos e influências ambientais. Nesse processo, mecanismos como neurogênese, sinaptogênese, poda sináptica, mielinização e remodelação neural atuam de forma integrada para promover a construção e a especialização progressiva das redes neurais responsáveis pelas funções cognitivas, emocionais e sociais (Selemon, 2013; Tau et al., 2010; Dincheva et al., 2016).

A literatura analisada evidencia ainda que determinadas fases do desenvolvimento apresentam maior sensibilidade às influências ambientais. A primeira infância destaca-se pela intensa formação de conexões neurais e pela elevada receptividade às experiências de cuidado, nutrição e estimulação cognitiva (Britto et al., 2017; Black et al., 2017). A adolescência, por sua vez, representa uma segunda grande fase de reorganização cerebral, marcada pelo refinamento das funções executivas, pela maturação socioemocional e pelo fortalecimento das conexões entre regiões corticais e subcorticais (Modabbernia et al., 2021; Silvers, 2022). Essas etapas configuram importantes janelas de oportunidade para intervenções capazes de potencializar o desenvolvimento humano e reduzir vulnerabilidades futuras.

Os resultados também demonstram que fatores protetivos, como nutrição adequada, atividade física, qualidade do sono, cuidado responsivo, vínculos afetivos seguros e ambientes enriquecidos, favorecem trajetórias positivas de desenvolvimento cerebral (Cusick, 2016; Jing et al., 2024; Leisman et al., 2025). Em contrapartida, experiências adversas associadas à pobreza, negligência, privação psicossocial, conflitos familiares e estresse crônico podem comprometer processos determinantes de organização neural, ampliando vulnerabilidades cognitivas, emocionais e comportamentais (Fernandes et al., 2019; Nelson et al., 2019; Sicher et al., 2022). Tais achados reforçam a importância de políticas públicas e ações intersetoriais voltadas à proteção e promoção do desenvolvimento infantil e adolescente.

De modo geral, os estudos analisados convergem ao demonstrar que o desenvolvimento cerebral não constitui um processo rigidamente determinado pela genética, mas resulta de uma interação contínua entre biologia e experiência. Essa compreensão amplia as possibilidades de intervenção, prevenção e promoção do desenvolvimento humano, evidenciando a importância de ambientes favoráveis à aprendizagem, à saúde e ao bem-estar em todas as etapas da vida.

Do ponto de vista científico, esta revisão contribui para integrar conhecimentos provenientes da neurociência, educação e saúde, oferecendo uma visão abrangente dos mecanismos que sustentam a plasticidade cerebral. Sob a perspectiva aplicada, os resultados fornecem subsídios para profissionais da educação, saúde e assistência social, bem como para famílias e formuladores de políticas públicas, ao destacar fatores capazes de favorecer ou comprometer o desenvolvimento cerebral ao longo do ciclo vital.

Por fim, recomenda-se que futuras investigações aprofundem a compreensão dos mecanismos pelos quais fatores ambientais, sociais e culturais interagem com processos neurobiológicos ao longo do desenvolvimento, bem como avaliem a efetividade de intervenções voltadas ao fortalecimento das competências cognitivas, emocionais e sociais em diferentes contextos e etapas da vida. Tais avanços poderão contribuir para a elaboração de estratégias cada vez mais eficazes de promoção do desenvolvimento humano, da aprendizagem e da saúde mental.

AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Desenho, Cultura e Interatividade (PPGDCI) da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS) pelo apoio institucional ao desenvolvimento da pesquisa em curso, realizada de forma colaborativa por professores, pós-doutoranda e mestrands vinculados ao Programa. Esse suporte tem sido essencial para fortalecer a produção científica, ampliar o diálogo interdisciplinar e favorecer a construção coletiva do conhecimento no campo do desenvolvimento humano, da neuroplasticidade e das relações entre ciência, educação e sociedade. Reconhecemos a importância do PPGDCI/UEFS na consolidação de práticas acadêmicas comprometidas com a pesquisa, a formação qualificada e a difusão de saberes que contribuem para o avanço científico e social.

REFERÊNCIAS

- Alpes, M. F., Mishima, F., Zuanetti, P. A., & Fukuda, M. T. H. (2022). Linguagem oral, processamento fonológico e memória visuoespacial em crianças com histórico de subnutrição leve na primeira infância. *Audiology – Communication Research*, 27, e2653. <https://doi.org/10.1590/2317-6431-2022-2653>.
- Arain, M., Haque, M., Johal, L., Mathur, P., Nel, W., Rais, A., Sandhu, R., & Sharma, S. (2013). Maturation of the adolescent brain. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 9, 449–461. <https://doi.org/10.2147/NDT.S39776>

- Barbosa Filho, V. C., & Tricco, A. C. (2019). Revisão de escopo: Uma abordagem metodológica relevante para a síntese de evidências da literatura em saúde no Brasil. *Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde*, 24, e0082. <https://doi.org/10.12820/rbafs.24e0082>.
- Berger, A., Kofman, O., Livneh, U., & Henik, A. (2007). Multidisciplinary perspectives on attention and the development of self-regulation. *Progress in Neurobiology*, 82(5), 256–286. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.06.004>
- Black, M. M., Walker, S. P., Fernald, L. C. H., Andersen, C. T., DiGirolamo, A. M., Lu, C., McCoy, D. C., Fink, G., Shawar, Y. R., Shiffman, J., Devercelli, A. E., Wodon, Q. T., Vargas-Barón, E., Grandetti, F., Smith, J. A., Danaei, G., Bhutta, Z. A., & Early Childhood Development Coming of Age Collaborators. (2017). Early childhood development coming of age: Science through the life course. *The Lancet*, 389(10064), 77–90. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31389-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31389-7).
- Blakemore, S.-J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: Implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(3–4), 296–312. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01611.x>.
- Bray, K. O., Durbin, O., Hartanto, S., Khetan, M., Lontos, D., Manuele, S. J., Zwaan, I., Ganella, D., Herting, M. M., Kim, J. H., O'Connell, M., Pozzi, E., Schwartz, O., Seal, M., Simmons, J., Vijayakumar, N., & Whittle, S. (2024). Puberty and NeuroDevelopment in adolescents (PANDA): A study protocol. *BMC Pediatrics*, 24(1), Article 768. <https://doi.org/10.1186/s12887-024-05197-w>.
- Brenhouse, H. C., & Schwarz, J. M. (2016). Immunoadolescence: Neuroimmune development and adolescent behavior. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 70, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.05.035>.
- Britto, P. R., Lye, S. J., Proulx, K., Yousafzai, A. K., Matthews, S. G., Vaivada, T., Perez-Escamilla, R., Rao, N., Ip, P., Fernald, L. C. H., MacMillan, H., Hanson, M., Wachs, T. D., Yao, H., Yoshikawa, H., Cerezo, A., Leckman, J. F., Bhutta, Z. A., Early Childhood Development Interventions Review Group, & The Lancet Early Childhood Development Series Steering Committee. (2017). Nurturing care: Promoting early childhood development. *The Lancet*, 389(10064), 91–102. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31390-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31390-3).
- Buyanova, I. S., & Arsalidou, M. (2021). Cerebral white matter myelination and relations to age, gender, and cognition: A selective review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, Article 662031. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.662031>.
- Campos, A. R. O., Alves, E. M., Silva, J. L., & Amâncio, N. F. G. (2025). Tratamentos farmacológicos e não medicamentosos para TDAH em crianças: Uma revisão. *Revista JRG de Estudos Acadêmicos*, 8(18), e181788. <https://doi.org/10.55892/jrg.v8i18.1788>.
- Cardenas, V. A., Greenstein, D., Fouche, J.-P., Ferrett, H., Cuzen, N., Stein, D. J., & Fein, G. (2013). Not lesser but greater fractional anisotropy in adolescents with alcohol use disorders. *NeuroImage: Clinical*, 2, 804–809. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2013.06.002>.
- Chade, E. S., Rocha Júnior, O., Souza, N. M. P., Silva, A. J. O. K., Ferreira, L. M., Reolon, J. B.,

- Bonini, J. S., Rego, F. G. M., & Sari, M. H. M. (2024). The influence of nutritional status on brain development: Benefits of exclusive breastfeeding. *Pediatric Reports*, 16(3), 724–735. <https://doi.org/10.3390/pediatric16030061>
- Christakis, D. A., Ramirez, J. S. B., Ferguson, S. M., Ravinder, S., & Ramirez, J.-M. (2018). How early media exposure may affect cognitive function: A review of results from observations in humans and experiments in mice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(40), 9851–9858. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711548115>.
- Cordeiro, L., & Soares, C. B. (2020). Revisão de escopo: Potencialidades para a síntese de metodologias utilizadas em pesquisa primária qualitativa. *BIS: Boletim do Instituto de Saúde*, 21(2), 37–44.
- Crespi, L., Noro, D., & Nóbile, M. F. (2020). Neurodesenvolvimento na primeira infância: Aspectos significativos para o atendimento escolar na educação infantil. *Ensino em Re-Vista*, 27(Número Especial), 1517–1541. <https://doi.org/10.14393/ER-v27nEa2020-15>
- Crews, F. T., Vetreno, R. P., Broadbent, N. J., & Robinson, D. L. (2019). Mechanisms of persistent neurobiological changes following adolescent alcohol exposure. *Alcoholism: Clinical and Experimental Research*, 43(1), 36–49. <https://doi.org/10.1111/acer.13903>.
- Cusick, S. E., & Georgieff, M. K. (2016). The role of nutrition in brain development: The golden opportunity of the first 1000 days. *The Journal of Pediatrics*, 175, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2016.05.013>.
- Damme, K. S. F., Vargas, T. G., Walther, S., Shankman, S. A., & Mittal, V. A. (2024). Physical and mental health in adolescence: Novel insights from a transdiagnostic examination of FitBit data in the ABCD study. *Translational Psychiatry*, 14, Article 75. <https://doi.org/10.1038/s41398-024-02794-2>.
- Dincheva, I., Pattwell, S. S., Lee, F. S., & Casey, B. J. (2016). The role of BDNF in the development of fear learning. *Depression and Anxiety*, 33(10), 907–917. <https://doi.org/10.1002/da.22572>.
- Dow-Edwards, D., MacMaster, F. P., Peterson, B. S., Niesink, R., Andersen, S., & Braams, B. R. (2019). Experience during adolescence shapes brain development: From synapses and networks to normal and pathological behavior. *Neurotoxicology and Teratology*, 76, Article 106834. <https://doi.org/10.1016/j.ntt.2019.106834>.
- Dumontheil, I. (2016). Adolescent brain development. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.012>.
- Fernandes, J. C. M., & Melo, S. R. (2019). Relação entre pobreza e desenvolvimento cerebral na infância. *Arquivos do MUDI*, 23(3), 442–454.
- Freitas, N. F., & Ariosi, C. M. F. (2021). Toda criança tem direito a apego: Considerações sobre afeto e apego. *Brazilian Journal of Development*, 7(12), 113727–113736. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n12-248>.
- Gabriel, P., Mastracchio, T.-A., Bordner, K., & Jeffrey, R. (2020). Impact of enriched

- environment during adolescence on adult social behavior, hippocampal synaptic density and dopamine D2 receptor expression in rats. *Physiology & Behavior*, 226, Article 113133. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2020.113133>.
- Gordon, M. (2003). Roots of empathy: Responsive parenting, caring societies. *Keio Journal of Medicine*, 52(4), 236–243.
- Harris, E. P., McGovern, A. J., Melo, T. G., Barron, A., Nolan, Y. M., & O'Leary, O. F. (2022). Juvenile stress exerts sex-independent effects on anxiety, antidepressant-like behaviours and dopaminergic innervation of the prelimbic cortex in adulthood. *Behavioural Brain Research*, 421, Article 113725. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2021.113725>.
- Jing, J.-Q., Jia, S.-J., & Yang, C.-J. (2024). Physical activity promotes brain development through serotonin during early childhood. *Neuroscience*, 554, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.07.015>
- Jolles, J., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain: A neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, Article 76. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076>.
- Juraska, J. M., & Willing, J. (2017). Pubertal onset as a critical transition for neural development and cognition. *Brain Research*, 1654(Part B), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2016.09.012>
- Kirkland, J. M., Edgar, E. L., Patel, I., Feustel, P., Belin, S., & Kopec, A. M. (2024). Synaptic pruning during adolescence shapes adult social behavior in both males and females. *Developmental Psychobiology*, 66(3), e22473. <https://doi.org/10.1002/dev.22473>.
- Knickmeyer, R. C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J. K., Hamer, R. M., Lin, W., Gerig, G., & Gilmore, J. H. (2008). A structural MRI study of human brain development from birth to 2 years. *The Journal of Neuroscience*, 28(47), 12176–12182. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3479-08.2008>.
- Leisman, G., Alfasi, G., & D'Angiulli, A. (2025). Emotional brain development: Neurobiological indicators from fetus through toddlerhood. *Brain Sciences*, 15(1), Article 38. <https://doi.org/10.3390/brainsci15010038>.
- Litzky, J. F., Deyssenroth, M. A., Everson, T. M., Armstrong, D. A., Lambertini, L., Lesseur, C., Marsit, C. J., Chen, J., Karagas, M. R., Li, Z., Chen, J., Padbury, J. F., Lester, B. M., & Cowell, W. J. (2018). Prenatal exposure to maternal depression and anxiety on imprinted gene expression in placenta and infant neurodevelopment and growth. *Pediatric Research*, 83(5), 1075–1083. <https://doi.org/10.1038/pr.2018.27>.
- Lopes, G. C. D. (2020). A neurociência a serviço da aprendizagem e da educação. *Revista Científica Cognitionis*, 1(2), 1–11. <https://doi.org/10.38087/2595.8801.22>.
- Lopes, G. C. D. (2020). A neurociência à serviço da aprendizagem e da educação. *Cognitionis Scientific Journal*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.38087/2595.8801.22>
- Maski, K., & Kothare, S. V. (2013). Sleep deprivation and neurobehavioral functioning in children. *International Journal of Psychophysiology*, 89(2), 259–264.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.06.019>.

- Matias, C. C., Reis, G. T., & Besson, J. C. F. (2023). Transtorno de personalidade borderline e os fatores que influenciam seu desenvolvimento: Uma relação entre o comportamento autodestrutivo, relações familiares, traumas infantis e alterações fisiopatológicas. *Brazilian Journal of Development*, 9(5), 15952–15972. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n5-100>.
- Modabbernia, A., Janiri, D., Doucet, G. E., Reichenberg, A., & Frangou, S. (2021). Multivariate patterns of brain-behavior-environment associations in the Adolescent Brain and Cognitive Development (ABCD) Study. *Biological Psychiatry*, 89(5), 510–520. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2020.08.014>.
- Moreira, L. H., Luna, R. C. C., Braga, A. V., Constante, F. C., Constante, F. C., Maia, L. C. O., Landim, R. M. O. A., & Rodrigues, R. F. M. (2021). Consequências do tempo de tela precoce no desenvolvimento infantil. *Brazilian Journal of Development*, 7(10), 97125–97133. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n10-156>.
- Murty, V. P., Calabro, F., & Luna, B. (2016). The role of experience in adolescent cognitive development: Integration of executive, memory, and mesolimbic systems. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 70, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.034>.
- Nelson III, C. A., Zeanah, C. H., & Fox, N. A. (2019). How early experience shapes human development: The case of psychosocial deprivation. *Neural Plasticity*, 2019, Article 1676285. <https://doi.org/10.1155/2019/1676285>
- Nunes, K. G., Tonietto, L., Dias, K., & Rego, C. (2021). O impacto dos maus-tratos na infância no desenvolvimento cerebral e no funcionamento cognitivo: Uma revisão. *Diaphora*, 9(4), 9–13.
- Nyaradi, A., Li, J., Hickling, S., Foster, J., & Oddy, W. H. (2013). The role of nutrition in children's neurocognitive development, from pregnancy through childhood. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, Article 97, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00097>.
- Oliveira, R. S., Bianchi, L. R. O., Campos, C. B. H. F., & Sant'Ana, D. M. G. (2019). Neuroplasticidade e educação: A literacia relacionada ao desenvolvimento cerebral. *Arquivos do MUDI*, 23(3), 172–188.
- Ortiz-Valladares, M., Gonzalez-Perez, O., & Pedraza-Medina, R. (2024). Bridging the gap: Prenatal nutrition, myelination, and schizophrenia etiopathogenesis. *Neuroscience*, 558, 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.08.019>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(2), 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.12.008>.
- Pesenti, M. C., Magenis, M. L., & Macan, T. P. (2019). Modulação da microbiota intestinal no tratamento de doenças neurológicas. *Revista Inova Saúde*, 9(Edição Especial), 190–203.

- Peters, M. D. J., Marnie, C., Tricco, A. C., Pollock, D., Munn, Z., Alexander, L., McClintock, A., Godfrey, C. M., & Khalil, H. (2020). Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBIM Evidence Synthesis*, 18(10), 2119–2126. <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>.
- Ramsaran, A. I., Schlichting, M. L., & Frankland, P. W. (2019). The ontogeny of memory persistence and specificity. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 36, Article 100591. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2018.09.002>.
- Sanger, K. L., & Dorjee, D. (2015). Mindfulness training for adolescents: A neurodevelopmental perspective on investigating modifications in attention and emotion regulation using event-related brain potentials. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 15(3), 696–711. <https://doi.org/10.3758/s13415-015-0354-7>.
- Santana, T. H. S., Mendes, D. F., Baltar, K. A., Mariano, A. C. S., Cruz, É. B. T., Fernandes, A. J. C., Rosado Neta, A. C., & Oliveira, D. F. (2024). A influência dos fatores multidimensionais e o neurodesenvolvimento infantil: Uma revisão dos efeitos biológicos, ambientais e sociais. *Brazilian Journal of Natural Sciences*, 6(1), 1–18. <https://doi.org/10.31415/bjns.v6i1.209>.
- Santos, P. V. M., Menezes, L. L. S., Caetano, F. M., Danaga, A. R., & Moda, L. M. R. (2023). Impactos da depressão gestacional no desenvolvimento fetal: Uma revisão integrativa. *Research, Society and Development*, 12(5), e12812541617. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41617>
- Schulz, K. M., & Sisk, C. L. (2016). The organizing actions of adolescent gonadal steroid hormones on brain and behavioral development. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 70, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.07.036>.
- Schutz, Q. C., Oliveira, V. M., Oliveira, C. S., Maciel, F. R., & Truccolo, A. B. (2022). Estudo de prevalência do uso de álcool por adolescentes escolares residentes em município da fronteira oeste do RS. *Brazilian Journal of Health Review*, 5(2), 6743–6753. <https://doi.org/10.34119/bjhrv5n2-242>
- Selemon, L. D. (2013). A role for synaptic plasticity in the adolescent development of executive function. *Translational Psychiatry*, 3(3), e238. <https://doi.org/10.1038/tp.2013.7>.
- Sicher, A. R., Duerr, A., Starnes, W. D., & Crowley, N. A. (2022). Adolescent alcohol and stress exposure rewires key cortical neurocircuitry. *Frontiers in Neuroscience*, 16, Article 896880. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.896880>
- Silva, R. C. C., Silva, Y. P., & Andrade, R. S. (2024). Exposição fetal ao álcool e seus efeitos no neurodesenvolvimento infantil: Uma revisão de literatura. *Research, Society and Development*, 13(12), e139131247781. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.47781>.
- Silvers, J. A. (2022). Adolescence as a pivotal period for emotion regulation development. *Current Opinion in Psychology*, 44, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2021.09.023>.
- Spates, C. R., Waller, S., Samaraweera, N., & Plaisier, B. (2003). Behavioral aspects of trauma in children and youth. *Pediatric Clinics of North America*, 50(4), 901–918.

[https://doi.org/10.1016/S0031-3955\(03\)00075-0](https://doi.org/10.1016/S0031-3955(03)00075-0).

- Tau, G. Z., & Peterson, B. S. (2010). Normal development of brain circuits. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2010.01.012>.
- Thijssen, S., Xerxa, Y., Norbom, L. B., Cima, M., Tiemeier, H., Tamnes, C. K., & Muetzel, R. L. (2024). Early childhood family threat and longitudinal amygdala-mPFC circuit development: Examining cortical thickness and gray matter-white matter contrast. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 70, Article 101462. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2024.101462>.
- Vaz, M. E. P., Gomes, S. A., Hermano, A. C., Macedo, J. A., & Silva, L. J. (2024). A relação entre níveis elevados de ansiedade na infância e o atraso do desenvolvimento cerebral. *Cuadernos de Educación y Desarrollo*, 16(2), 1–4. <https://doi.org/10.55905/cuadv16n2-ed.esp.303>.
- Vigil, P., Orellana, R. F., Cortes, M. E., Molina, C. T., Switzer, B. E., & Klaus, H. (2011). Endocrine modulation of the adolescent brain: A review. *Journal of Pediatric and Adolescent Gynecology*, 24(6), 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.jpag.2011.01.06>.
- Vorkapic-Ferreira, C., Góis, R. S., Gomes, L. P., Britto, A., Bastos, A., & Dantas, E. H. M. (2017). Nascidos para correr: A importância do exercício para a saúde do cérebro. *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, 23(6), 495–503. <https://doi.org/10.1590/1517-869220172306175209>.
- Zomignani, A. P., Zambelli, H. J. L., & Antonio, M. Â. R. G. M. (2009). Desenvolvimento cerebral em recém-nascidos prematuros. *Revista Paulista de Pediatria*, 27(2), 198–203.