

A superdotação é uma neurodivergência

Giftedness is a neurodivergence

La sobredotación es una neurodivergencia

Fernanda Rodrigues Fernandes¹

¹Bióloga, Especializanda em Neurociências e Comportamento/PUCRS, Doutora em Ecologia pela UNICAMP, Professora do Departamento de Biologia, da Universidade Federal do Maranhão. São Luís-MA, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5456-5133>

Resumo

Introdução. No Brasil, o olhar para a superdotação na legislação é dado pela área da Educação e é baseado em um modelo teórico vago que permite interpretações diferentes. A Educação e a legislação voltadas para esse público devem ser pautadas pelo conhecimento científico sobre o fenômeno da superdotação, que tem bases neurobiológicas e, portanto, é uma condição transcultural. **Objetivo.** Apresentar resultados de pesquisas recentes na área da Neurociência que corroboram a superdotação como uma neurodivergência, que tem como base de funcionamento uma alta eficiência cognitiva. **Método.** Revisão bibliográfica dos estudos recentes (principalmente dos últimos 10 anos), a fim de reunir as evidências do campo da neurociência sobre neurodesenvolvimento e capacidade cognitiva. **Resultados.** Vários estudos comparativos de crianças superdotadas e crianças com desenvolvimento típico, evidenciam diferenças nas capacidades biológicas relacionadas às funções cognitivas, bem como precocidade em marcos do desenvolvimento, que provavelmente resultam de uma maturação cortical diferencial. Abordar superdotação fora da perspectiva de neurodivergência, extrapola conclusões das evidências empíricas, implicando em "teorias" sem validação científica. Os avanços nos estudos neurocientíficos indicam que a superdotação surge de um neurodesenvolvimento diferente do padrão (atípico), que não é disfuncional, pois resulta em funcionamento cognitivo mais eficiente. **Conclusão.** A Neuropsicologia consiste na área mais adequada para conduzir a identificação de pessoas superdotadas, por meio da psicometria e bom raciocínio clínico baseado em Neurociência, devido ao maior domínio teórico do funcionamento cerebral.

Unitermos. Inteligência; neurodivergência; neurociência; superdotado

Abstract

Introduction. In Brazil, the view of giftedness in legislation is given by the field of education and is based on a vague theoretical model that allows for different interpretations. Education and legislation aimed at this public should be guided by scientific knowledge about the phenomenon of giftedness, which has neurobiological bases and is therefore a cross-cultural condition. **Objective.** To present the neurobiological view of the condition of giftedness and recent research in the field of neuroscience that confirms giftedness as a neurodivergence based on high cognitive efficiency. **Method.** A bibliographic review of recent studies published (especially in the last 10 years), to gather evidence from the field of neuroscience on neurodevelopment and cognitive ability. **Results.** Several comparative studies of groups of gifted children and typically developing children show differences in biological capacities related to cognitive functions, as well as precociousness in developmental milestones, probably resulting from differential cortical maturation. Approaching giftedness from the perspective of neurodivergence extrapolates conclusions from empirical evidence, implying "theories" without scientific validation. Advances in neuroscience studies indicate that giftedness results from neurodevelopment that is different from the norm (atypical), which is not dysfunctional because it results in more efficient cognitive functioning. **Conclusion.** Neuropsychology is the area best suited to identifying gifted people, through psychometrics and good clinical reasoning based on Neuroscience, due to the greater theoretical mastery of brain functioning.

Keywords. Intelligence; neurodivergence; neuroscience; gifted

Resumen

Introducción. En Brasil, la visión de la sobredotación en la legislación viene dada por el campo de la educación y se basa en un modelo teórico vago que permite diferentes interpretaciones. La educación y la legislación dirigidas a este público deben guiarse por el conocimiento científico sobre el fenómeno de la sobredotación, que tiene bases neurobiológicas y, por lo tanto, es una condición transcultural. **Objetivo.** Presentar resultados de investigaciones recientes en el campo de la neurociencia que corroboran la sobredotación como una neurodivergencia basada en una alta eficiencia cognitiva. **Método.** Revisión bibliográfica de estudios recientes (especialmente en los últimos 10 años) con el fin de reunir evidencias del campo de la neurociencia sobre el neurodesarrollo y la capacidad cognitiva. **Resultados.** Diversos estudios comparativos entre niños sobredotados y niños con desarrollo típico muestran diferencias en las capacidades biológicas relacionadas con las funciones cognitivas, así como precocidad en los hitos del desarrollo, que probablemente se derivan de una maduración cortical diferencial. Abordar la sobredotación fuera de la perspectiva de la neurodivergencia extrapola conclusiones de la evidencia empírica, implicando "teorías" sin validación científica. Los avances en los estudios neurocientíficos indican que la sobredotación surge de un neurodesarrollo que difiere del estándar (atípico), lo cual no es disfuncional, ya que da lugar a un funcionamiento cognitivo más eficiente. **Conclusiones.** La neuropsicología es el área más adecuada para identificar a los superdotados, mediante la psicometría y el buen razonamiento clínico basado en la neurociencia, debido a su mayor dominio teórico del funcionamiento cerebral.

Palabras clave. Inteligencia; neurodivergencia; neurociência; sobredotado

Trabalho realizado na Universidade Federal do Maranhão. São Luís-MA, Brasil.

Conflito de interesse: não

Recebido em: 13/04/2024

Aceito em: 17/07/2024

Endereço de correspondência: Fernanda Rodrigues Fernandes. Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Departamento de Biologia. Av. dos Portugueses 1966. Bairro Bacanga. CEP 65080-805. São Luís-MA, Brasil. E-mail: fernanda.fernandes@ufma.br

INTRODUÇÃO

O que é superdotação?

Coleman 2004 escreveu:

"A necessidade de uma definição é indebatível. Um campo não pode ter qualquer coerência sem compreensão comum sobre os limites do fenômeno"¹.

Há muitas variações na concepção de superdotação, baseadas em modelos descritivos com pouca ou nenhuma evidência empírica. No início ela foi equiparada a uma inteligência elevada, com investigações centradas em teorias da inteligência e em métodos de medição da inteligência e depois ampliada, de forma arbitrária, para uma concepção

multidimensional de desenvolvimento de talentos em áreas específicas^{2,3}.

Inicialmente, a concepção de superdotação como sinônimo de alta inteligência foi dominante durante a maior parte do século 20 até a década de 1990, por meio dos estudos de Lewis Terman com crianças superdotadas e construção de testes cognitivos⁴. Terman realizou estudos longitudinais de grande escala, com mais de 1.000 indivíduos com alto coeficiente de inteligência (QI), apresentando informações detalhadas sobre alunos superdotados⁴, onde encontrou como características de uma alta inteligência:

“[...] compreensão rápida, curiosidade insaciável, informação extensa, memória retentiva, fala precoce, vocabulário incomum [...]”⁵

Posteriormente, houve uma onda de modelos de desenvolvimento de talentos, que ganhou força na área da Educação com a perspectiva de desenvolver as diferentes potencialidades da nação, a fim de aumentar o reservatório de pessoas na sociedade que ajudariam a resolver os problemas da civilização contemporânea⁶. Como exemplo, o modelo das Inteligências Múltiplas de Howard Gardner, conhecida como ‘*MI theory*’, propunha a existência de oito “inteligências”: linguística, lógico-matemática, espacial, corporal-cinestésica, musical, interpessoal, intrapessoal e naturalista³. Ele captura uma gama completa dos tipos de características valorizadas pelas culturas humanas.

No entanto, a teoria das Inteligências Múltiplas de Gardner é claramente um neuromito, baseado em teorias da

década de 1980 da modularidade cerebral para cognição, no entanto, o avanço das pesquisas em neurociência mostrou que o cérebro não está organizado em módulos completamente separados e dedicados a formas específicas de cognição, não havendo evidências de que exista uma base cerebral para cada inteligência⁷. Segundo Waterhouse 2023:

“A crença generalizada em um neuromito não torna uma teoria legítima, uma vez que teorias devem ser validadas através de acúmulo de evidências empíricas. Chegou o momento da teoria das inteligências múltiplas ser rejeitada, de uma vez por todas, e dos educadores recorrerem a estratégias de ensino baseadas em evidências.”⁶

Mas a concepção de superdotação como elevada inteligência geral, que pode ser avaliada de forma confiável através de testes cognitivos, representando a capacidade biológica de aprender mais rapidamente, dominar ideias complexas e raciocinar em um nível mais alto de abstração⁸ não foi substituída por essas concepções de desenvolvimento de talentos. Sendo ainda a concepção mais difundida na maioria dos estados americanos⁹⁻¹¹ e países europeus¹²⁻¹⁴, diferindo apenas na pontuação de corte dos testes de inteligência para ser considerado uma pessoa superdotada. As descobertas que pessoas que obtêm bons resultados em um teste cognitivo tendem a obter bons resultados em todos os outros, não importa quão diferentes possam ser as habilidades cognitivas avaliadas, foram replicadas consistentemente ao longo dos anos¹⁵.

Um estudo revelou que os pontos de corte da pontuação de QI mais comumente utilizados para inclusão no grupo de

indivíduos superdotados nas pesquisas científicas foi $QI \geq 130$ (2 desvios-padrão acima da média), sendo usado por 52,5% daqueles que relataram uma pontuação de corte nos estudos e outros 22,5% daqueles que relataram uma pontuação de corte, usaram uma pontuação de $QI \geq 120$ ¹⁶. Os diferentes níveis de inteligência, baseados nos desvios-padrão da norma, representam diferentes níveis de funcionamento, que por sua vez representam a magnitude de diferenças do desenvolvimento¹¹. As taxas de superdotação utilizando o QI como base, engloba 9,1% da população em um ponto de corte de QI 120, 2,3% da população em um ponto de corte de QI 130 e 0,4% da população em um ponto de corte de QI 140¹⁷.

A declaração da Conferência de Consenso da Academia Americana de Neuropsicologia Clínica (AACN) estabelece uma classificação uniforme de pontuações de testes de desempenho com distribuição normal, como os testes de inteligência. Segundo essa classificação, as pontuações de QI 120 a 129 (percentil 91 a 97) devem ser classificadas como 'acima da média' e as pontuações de $QI \geq 130$ (percentil ≥ 98) devem ser classificadas como 'excepcionalmente alta'¹⁸. As classificações de percentis possuem grande relevância porque informam quão comuns ou incomuns são tais resultados na população normativa¹⁹.

Devido essa classificação diferente, para $QI \geq 130$, inclusive nos manuais de testes de inteligência, como escalas Wechsler e no SON-R, com pontuações de QI 120 a 129 sendo classificadas como 'superior' e pontuações de $QI \geq 130$

sendo classificadas como 'muito superior', alguns profissionais fazem distinção nos laudos psicológicos com enfoque neuropsicológico, atribuindo para a classificação superior ou acima da média, a descrição de 'altas habilidades' e a para a classificação muito superior ou excepcionalmente alta, a descrição de 'superdotação'. A inteligência geral (*g*), como fenômeno estatístico, é uma descoberta universal em diferentes baterias de testes cognitivos¹⁵.

No Brasil, o olhar para a superdotação na legislação é dado pela área da Educação e é baseado em um modelo teórico vago que permite interpretações diferentes, voltado para o desenvolvimento de talentos. A superdotação é definida pela Concepção de Superdotação dos Três Anéis, do psicólogo Joseph Renzulli², que somente encontrou aceitação para publicação no campo da educação para superdotados, por ser considerada uma definição operacional e útil para os profissionais da escola. Seu modelo propõe que o comportamento de superdotação surge quando há a interseção de três fatores: habilidade acima da média, alto comprometimento com a tarefa (motivação) e alta criatividade².

Essa visão torna o grupo "superdotado" bem amplo e heterogêneo (pela união de concepções diferentes, "*gifted*" e "*talented*"), dificultando ações práticas e efetivas de inclusão no ambiente escolar, por possuírem demandas muito diferentes, muitas delas fora da essência da escola que são os processos de ensino formal e aprendizagem. A tríade

de Renzulli tem sido objeto de críticas desde a sua publicação, por ser uma definição orientada para o futuro, com critérios subjetivos e difíceis de medir²⁰, que seleciona pessoas focadas em metas, compreendendo a superdotação como uma construção social, que leva a domínio em áreas específicas (*expertise*) com o tempo²¹.

McBee e Makel 2019 apresentam uma crítica:

"[...] a ampla flexibilidade com que pesquisadores das ciências sociais coletam, analisam e comunicam seus dados com alto grau de liberdade [...] essa flexibilidade é problemática porque pode prejudicar a veracidade, generalização e confiança das conclusões"¹⁷.

Os pesquisadores apontam que os problemas com teorias imprecisas na Psicologia têm grandes paralelos na Educação, pois a flexibilidade pode influenciar resultados tão fundamentais quanto o número de alunos que possuem ou vivenciam determinadas condições e levar a resultados e políticas de implementação extremamente diferentes¹⁷.

Os alunos considerados "superdotados" sob diferentes definições são populações distintas, mas carregam a mesma classificação, fazendo com que profissionais e pesquisadores tratem essa população como equivalentes¹⁶. McBee e Makel 2019 afirmam que, para que:

"[...] conceitos sejam cientificamente úteis, devem ter especificidade e consistência interna suficientes [...] a proporção de indivíduos que atendem ao padrão de superdotação sob algumas definições é irrealisticamente alta, indicando que o rigor e a auto consistência interna dos conceitos educacionais requerem aprimoramento [...] uma definição que diz que cerca de 10% são superdotados, implicando

estar entre os 10% melhores em qualquer um de um grande conjunto de conhecimentos, habilidades e esforços, é uma impossibilidade matemática. Ambas as afirmações não podem ser verdadeiras.”¹⁷.

Diferente de domínios em áreas específicas, que requer prática deliberada²¹, a inteligência é uma característica biológica e existe em um contínuo dentro da população onde, apesar dos pontos fortes e fracos individuais, todas as pessoas estão em algum lugar entre muito baixo e muito alto em sua capacidade cognitiva para aprender e usar informações²². A superdotação, que se encontra no extremo oposto ao da deficiência intelectual, seria um superávit das capacidades mentais, apresentando uma elevada eficiência cognitiva.

No entanto, neuromitos e pseudociência ainda estão enraizados em muitas formações e ambientes educacionais, sendo importante a atualização dos conhecimentos científicos²³. Com o avanço do conhecimento da Neurociência, é possível retomar a compreensão do fenômeno da superdotação, como esse funcionamento difere do funcionamento típico, trazendo um esclarecimento empírico para o conceito. E uma vez compreendendo esse fenômeno como uma neurodivergência, é possível tornar o grupo mais homogêneo, com consistência interna suficiente. Como superdotação e talento compreendem manifestações diferentes, a legislação voltada para esse público precisa ser atualizada, a partir das novas descobertas científicas, que apresentam um melhor modelo explicativo para o fenômeno.

Este trabalho tem como objetivo consolidar o conceito científico de superdotação, no qual a alta inteligência geral (*g*) é o componente central, com base nas evidências neurocientíficas a fim de evitar formas subjetivas de identificação, sendo importante tanto para o atendimento das necessidades educacionais especiais desse público, como para o avanço das pesquisas nacionais.

MÉTODO

Revisão bibliográfica dos artigos publicados, principalmente nos últimos 10 anos, em periódicos conceituados na área de Neurociência, que são mais exigentes quanto ao rigor do método científico, tais como *Intelligence, Development Cognitive Neuroscience, Nature, Nature Neuroscience, Nature Genetics, Science, Trends in Cognitive Sciences, Molecular Psychiatry*, entre outros, como forma de reunir evidências e trazer uma compreensão consistente das bases neurobiológicas da superdotação. Foi feita uma análise crítica dos artigos incluídos e foi apresentado uma síntese do conhecimento atual.

O problema norteador da pesquisa é: Qual é a definição científica de superdotação com base na Neurociência? Qual o critério objetivo central na identificação de superdotados?

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Bases neurobiológicas de que a superdotação é uma neurodivergência

Gottfredson 1997 coloca que a inteligência geral é definida como:

“[...] a capacidade de raciocinar, planejar, resolver problemas, pensar de forma abstrata, compreender ideias complexas, aprender rapidamente e aprender com a experiência. Não se trata, portanto, de uma mera aprendizagem de livros, de uma competência acadêmica restrita ou de inteligência para fazer testes”²⁴.

Correlações positivas universais entre diferentes testes cognitivos reforçam o conceito de ‘inteligência geral’ ou *g* de Spearman e permitem que os resultados de diferentes estudos possam ser comparados entre si²⁵. A capacidade cognitiva geral é apoiada também por estudos que demonstram que mesmas regiões frontais são recrutadas por uma ampla gama de diferentes demandas cognitivas (conectividade funcional), sugerindo que a inteligência geral reflete funções de um sistema frontal específico^{25,26}. Portanto, a inteligência é um produto do cérebro humano que surge da interação de um conjunto distribuído de regiões cerebrais, compreendendo principalmente regiões corticais frontal e parietal²⁷.

Inteligência, como um fenótipo, é medida por meio de testes cognitivos. Com base em marcadores de DNA e pontuações de *g* em 2.875 crianças dos sete aos 12 anos de idade, encontrou-se uma correlação genética do DNA com a inteligência de 0,73, muito semelhante à correlação genética

de 0,75 estimada para 6.702 pares de gêmeos da mesma amostra²⁸, sendo que uma correlação pode ser considerada forte quando seu valor é maior do 0,50. Dados do *Philadelphia Neurodevelopmental Cohort* (PNC), uma grande amostra populacional de 6.634 indivíduos com idade entre oito e 21 anos, demonstraram que medidas neurocognitivas na infância e no início da idade adulta eram significativamente hereditárias²⁹. Outro estudo, com dados de 1.940 indivíduos cuja inteligência foi medida na infância e na velhice, encontrou que a correlação genética entre a inteligência aos 11 anos de idade e na velhice foi de 0,62, apontando que os fatores hereditários que influenciam a inteligência na infância também a afetam na velhice, havendo uma estabilidade ao longo da vida³⁰.

Os instrumentos com as cargas mais ricas na inteligência geral (*g*) são os mais úteis para localizar crianças superdotadas⁹. Como os mecanismos de processamento da linguagem e processamento abstrato e visuoespacial mediam processos de raciocínio humano, tarefas verbais e não-verbais (perceptivas e figurativas) com altas cargas de *g* são utilizadas para analisar as diferentes capacidades cognitivas da população. Inteligência verbal e não-verbal compartilham uma origem genética comum com uma rede neural anatômica, envolvendo as massas cinzentas frontais, occipitais e para-hipocampais e conectando a massa cinzenta do fascículo occipitofrontal superior e do corpo caloso³¹. Diferenças individuais na inteligência se correlacionam com a função cerebral mesmo quando o cérebro está envolvido

em tarefas de não-raciocínio, implicando que indivíduos com altas pontuações de *g* podem processar informações de forma diferente, até quando nenhum raciocínio ou resolução de problemas é necessário³².

As representações numéricas abstratas ou senso numérico (como entidades abstratas e independente da notação) se desenvolve gradualmente na espécie humana ao longo dos primeiros anos de vida³³ e não é uma exclusividade da nossa espécie. Portanto uma capacidade quantitativa básica de contar, comparar, sequenciar e estimar estão presentes antes do ensino formal³⁴, sendo precursoras para o desenvolvimento do conhecimento matemático mais complexo adquirido por meio do ensino formal³⁵. A linguagem também é desenvolvida devido nossa capacidade biológica, fazendo parte da nossa herança evolutiva.

A capacidade de desenvolver a linguagem está relacionada com assimetrias e processo de mielinização de algumas partes do cérebro, sendo prevista pela assimetria esquerda do conteúdo de mielina no caudado e córtex pré-frontal e assimetria para a direita na cápsula extrema³⁶. As habilidades perceptivas que tornam a linguagem falada possível, se desenvolvem de forma constante desde o nascimento, e quanto mais cedo os bebês mostrarem as respostas cerebrais localizadas à esquerda, tipicamente indicando a detecção de palavras na fala, melhores serão suas habilidades de linguagem na primeira infância³⁷. As diferenças individuais na compreensão da linguagem estão

relacionadas a uma rede de centros de processamento cortical colaboradores³⁸.

A inteligência é apoiada por uma extensa rede neural na qual as áreas frontal e parietal desempenham um papel importante³⁹, havendo um núcleo cognitivo de domínio-geral, chamado sistema cortical de demanda múltipla (MD, *multiple-demand*), onde áreas frontal e parietal são co-ativadas ao realizar uma ampla gama de tarefas cognitivamente exigentes, incluindo atenção seletiva, memória de trabalho, troca de tarefas, inibição de respostas, monitoramento de conflitos, nova resolução de problemas e entre outras, que implica em uma rápida integração e troca de informação⁴⁰, sendo a força da conectividade funcional frontoparietal preditiva de pontuações de inteligência⁴¹. A variação genética é responsável uma proporção substancial das diferenças individuais na inteligência humana, sendo consistente com muitos genes de pequenos efeitos subjacentes às influências genéticas aditivas na inteligência⁴², sendo assim uma herança poligênica.

Estudo comparativo entre gêmeos idênticos (monozigóticos) e não idênticos (dizigóticos) revelou que algumas regiões corticais, incluindo o córtex frontal, estão sob forte controle genético⁴³. Outro estudo demonstrou que o volume total do cérebro está positivamente correlacionado com a inteligência geral e ambos compartilham uma origem genética comum, sendo que a dimensão memória de trabalho apresentou a mais alta correlação genética e fenotípica com volume cerebral⁴⁴. Os fatores genéticos

parecem contribuir muito para a estabilidade das diferenças de inteligência ao longo da maior parte da vida humana^{28,30}.

Um dos maiores estudos de associação genética de inteligência (n=269.867 indivíduos) identificou 205 loci genômicos e implicou 1.016 genes associados à capacidade cognitiva⁴⁵. A inteligência é altamente poligênica e pequenos efeitos genéticos em fases críticas do desenvolvimento podem ter grandes consequências na função e no desenvolvimento do cérebro⁴⁶. O nível educacional (*EduYears* = anos de educação como um fenótipo contínuo) é um traço comportamental hereditário, frequentemente usado como representante da capacidade cognitiva, pois apresenta uma alta correlação genética, demonstrando que há uma base genética do nível educacional⁴⁷. A pontuação poligenética do nível educacional (*EduYears-PGS*) tem uma associação localizada no cérebro, no sulco intraparietal, uma região relacionada à inteligência não verbal⁴⁸.

Um estudo de meta-análise do volume cerebral com dados da associação genômica ampla (GWAS; n=47.316 indivíduos), seguida de anotação biológica funcional e mapeamento genético identificou 92 genes compartilhados entre volume cerebral e inteligência, que estão envolvidos principalmente em vias de sinalização que regulam o crescimento celular, sendo que 32 genes parecem ter maior probabilidade de impacto funcional⁴⁹, logo tipos celulares e genes neuronais específicos parecem estar envolvidos na inteligência⁵⁰. Em seres humanos, o tamanho dos dendritos nos neurônios piramidais está diretamente relacionado às

pontuações de QI e às medidas de integração dentro de toda a rede cerebral, sendo que o crescimento e a manutenção de grandes dendritos e suas sinapses estão sob controle de genes relacionados à cognição humana que possuem expressão elevada nesses neurônios piramidais^{50,51}.

O dobramento do cérebro humano ocorre principalmente no útero e o padrão resultante, apesar de globalmente estável entre os indivíduos, o que permite identificar e comparar sulcos análogos dentro da população, apresenta variação na morfologia dos giros e sulcos corticais dentro da população⁵². Muitas respostas cerebrais têm sido localizadas em regiões anatômicas específicas, que podem ser restringidas por padrões girais e sulcais, onde a morfologia cortical ao nascimento pode representar um bom marcador fenotípico (endofenótipo) do desenvolvimento cerebral global⁵³. Um estudo identificou um gene específico que controla o número de giros que se formam em uma região do córtex cerebral que inclui a área de Broca (a principal área da linguagem)⁵⁴.

A neuroplasticidade é um processo codificado geneticamente que leva a mudança na estrutura e função neural em resposta à experiência ou estímulos ambientais⁵⁵. No entanto, os efeitos da experiência operam dentro dos limites imposto pelo genoma a um circuito, que incluem a capacidade de orientar mudanças na arquitetura e bioquímica do cérebro e em desencadear ou encerrar a plasticidade do período sensível⁵⁶. Existem janelas de maturação e períodos sensíveis importantes na primeira

infância e com a maturação do cérebro no decorrer do tempo, a plasticidade é diminuída. O elevado QI pode estar relacionado a uma alta densidade de fibras e redes cerebrais distribuídas de forma otimizada, bem como alto nível e/ou densidade de mielinização axonal⁴¹, permitindo uma transferência de informação mais eficaz entre sub-redes cerebrais e uma integração de informação mais forte⁵⁷.

Estudos comparativos entre grupos de crianças superdotadas e crianças com desenvolvimento típico, evidenciam diferenças nas capacidades biológicas relacionadas as funções cognitivas. Estudos de desenvolvimento infantil têm reunido evidências que crianças superdotadas desenvolvem habilidades sensoriais, locomotoras, neuropsicológicas e de linguagem mais cedo que o esperado para a faixa etária e que podem possuir uma forma específica de funcionamento cerebral com uma grande capacidade de processamento de informações à sua disposição, o que confere grande flexibilidade e maior plasticidade cerebral do que crianças com inteligência média¹³.

Outros estudos demonstram que crianças superdotadas, quando comparadas com crianças não superdotadas, apresentam maior capacidade de memória de trabalho⁵⁸, atenção executiva mais eficaz e com maior acurácia⁵⁹, bem como maior nível de desempenho nas habilidades de pensamento crítico⁶⁰. Uma eficiência funcional, ou seja, baixo consumo de energia em áreas cerebrais relevantes para a tarefa está relacionada à maior

inteligência, especialmente quando a dificuldade da tarefa não é nem particularmente alta e nem particularmente baixa⁶¹. Por exemplo, leitores com alta capacidade de memória operacional provocavam significativamente menos ativação durante uma tarefa de compreensão de leitura do que leitores com baixa capacidade de memória de trabalho, ou seja, apresentam maior eficiência³⁸.

Estudos neurocientíficos indicam que o desenvolvimento cortical ocorre de modo diferente nas pessoas com inteligência superior, constituindo em mais uma base neurobiológica da condição de superdotação. A maturação cortical, incluindo mudanças relacionadas à idade na espessura, área de superfície e dobramento, desempenham um papel central no desenvolvimento da função cerebral e plasticidade, com alterações corticais e cognitivas se relacionando reciprocamente⁶². A natureza distribuída da inteligência no cérebro sugere um papel crucial da integridade da substância branca e uma estrutura de rede neurológica eficiente⁶¹.

Além de estudos sobre a conectividade funcional durante tarefas ativas e inteligência, a análise da conectividade em repouso, examinando a rede de modo padrão (DMN, *default-mode network*), que se refere ao conjunto de regiões mais ativas durante a atividade espontânea do cérebro quando ele não está ativamente envolvido em uma tarefa, demonstrou que as pontuações dos participantes nas escalas de inteligência Wechsler estavam significativamente correlacionadas com a

conectividade funcional entre regiões cerebrais distribuídas nos lobos frontal, parietal, occipital e límbico – durante o repouso, apoiando uma visão em rede da inteligência⁶³.

Um estudo comparativo com análises longitudinais de 307 crianças e adolescentes, com inteligência superior (QI 121 a 149) e com inteligência média, usando imagens de ressonância magnética (MRI) demonstrou que, aquelas com inteligência superior apresentam um período prolongado de ganho cortical pré-frontal e uma taxa de mudança mais rápida. E as correlações positivas mais notáveis com o QI no final da infância ocorrem no córtex pré-frontal, uma região que está no topo da hierarquia de processamento de informações⁶⁴.

Outra pesquisa examinou a relação entre QI e mudanças na área de superfície e espessura cortical ao longo do tempo em 504 indivíduos saudáveis, entre 9 e 60 anos. Os autores encontraram que a relação entre córtex esquerdo mais fino e maior inteligência torna-se mais pronunciada com o aumento da idade: quanto maior o QI, mais rápido o afinamento do córtex esquerdo ao longo do tempo. Assim as grandes mudanças na espessura cortical ao longo do tempo estão associadas a QI alto, enquanto a espessura cortical muda menos naqueles indivíduos com QI mais baixo. Sendo que a associação entre inteligência e espessura cortical é particularmente proeminente no giro frontal inferior esquerdo e no plano temporal esquerdo, também conhecidos como área de Broca e giro de Heschl, ambos envolvidos no processamento da linguagem⁶⁵.

As relações entre QI e medidas corticais sugerem que existem três períodos distintos de desenvolvimento cortical: o primeiro período vai até os 10-12 anos, sendo marcado pela expansão da superfície cortical. Nesse período, a expansão da superfície cortical é maior naqueles indivíduos com maior inteligência⁶⁵; no segundo período, que dura até aproximadamente os 21 anos, a relação entre QI e expansão da superfície é inversa, sendo que a expansão cortical completa é alcançada em uma idade mais precoce em indivíduos mais inteligentes, seguida por redução acelerada. Simultaneamente, o córtex está se afinando, refletindo um refinamento dos circuitos neurais via poda neural, um processo que é exagerado no hemisfério esquerdo de pessoas mais inteligentes (QI=140)⁶⁵; no terceiro período, a contração da superfície continua e, embora sua relação com o QI permaneça inalterada, a associação entre QI e mudança de espessura cortical se inverte e o afinamento do córtex esquerdo continua em indivíduos com menor inteligência, mas engrossa em indivíduos com maior inteligência, eventualmente levando a uma associação positiva entre espessura e QI em indivíduos mais inteligentes a partir dos 42 anos. Os indivíduos com QI mais alto têm o curso mais extremo, com a maior magnitude de mudança⁶⁵.

Um estudo sobre a contribuição diferencial das morfologias corticais em 740 indivíduos jovens saudáveis evidenciou que, enquanto o dobramento nas regiões corticais distribuídas apresentou associação positiva com a inteligência fluída e inteligência cristalizada, a área

superficial e a espessura apresentaram mais associações regionais. Especificamente, maior desempenho em inteligência fluida foi associado com expansão cortical em regiões relacionadas à memória de trabalho, atenção e processamento visuoespacial, enquanto maior desempenho em inteligência cristalizada foi associado com córtex mais fino, bem como maior área de superfície cortical em redes relacionadas à linguagem⁶⁶.

Um estudo comparativo com 18 crianças altamente superdotadas. ($QI \geq 145$) e 12 crianças de inteligência menor demonstrou que os sistemas de memória no cérebro de crianças com habilidades intelectuais excepcionais são dimensionados e conectados de maneira diferente em comparação com cérebros de crianças com menor QI. As crianças altamente superdotadas tinham estruturas subcorticais maiores e uma organização microestrutural da substância branca mais altamente conectada entre essas estruturas em regiões associadas à memória explícita e ao QI: hipocampo bilateral e putâmen direito. Especificamente o putâmen, provavelmente através de conexões integradoras com o córtex pré-frontal e sub-regiões do hipocampo associadas a novas aprendizagens e integração de informações, eram maiores em crianças altamente superdotadas⁶⁷.

Portanto, os resultados indicam que crianças mais inteligentes apresentam um córtex particularmente plástico, com uma fase inicial acelerada e prolongada de aumento cortical⁶⁴, alcançando uma maior área de superfície, em uma

idade mais jovem⁶⁵, o que permite maior alocação de recursos, capacidade computacional e funcional⁶⁶. Então o córtex mais espesso pode ser reduzido de forma mais otimizada para formar uma rede mais eficiente, enquanto a idade mais jovem em que esse processo pode iniciar, fornece tempo extra para otimização⁶⁵, facilitando a eficiência em tarefas baseadas em conhecimento⁶⁶.

CONCLUSÃO

Superdotação é uma condição neurobiológica que apresenta diferentes níveis ou graus, corroborado por dados de neuroimagem, correspondendo à magnitude da trajetória de desenvolvimento cortical diferente. Logo, inerentemente, a inteligência é utilizada como ferramenta de medição para identificar pessoas superdotadas, como forma de acessar o funcionamento cognitivo. Essa definição científica e objetiva de superdotação difere de alguns modelos teóricos subjetivos, que incluem talentosos e superdotados dentro da mesma categoria e unem crianças de desenvolvimento típico e crianças de desenvolvimento atípico como possuindo o mesmo funcionamento, gerando efeitos confundidores sobre os limites do fenômeno.

Uma vez que o funcionamento cerebral típico, corresponde obrigatoriamente, aos funcionamentos mais frequentes encontrados na população, os extremos opostos da distribuição normal, são observações raras. Portanto, a deficiência intelectual e a alta eficiência intelectual (superdotação) são funcionamentos significativamente

diferentes do funcionamento 'padrão', sendo considerados *outliers*, que na estatística consiste no valor atípico, uma observação que se afasta das demais.

É necessária essa compreensão das causas proximais ou mecanismos biológicos que tornam a superdotação uma neurodivergência. Existe uma base neural para a inteligência geral, *g*, sendo a inteligência um reflexo da função de um sistema neural específico, assim, os testes de QI medem capacidades biológicas que possuem variação dentro população, uma vez que, a capacidade cognitiva (*g*) tem se mostrado altamente hereditária por muitos estudos, demonstrando a influência dos genes expressos no cérebro nos processos de neurodesenvolvimento (estrutura e função de regiões corticais). Dessa forma, pontuações elevadas são associadas à capacidade de um indivíduo assimilar e aplicar rapidamente conhecimento, o que pode ser vantajoso em ambientes acadêmicos, no entanto, o sucesso acadêmico é dependente de motivação e outros fatores.

A Neurociência tem reunido evidências que corroboram a visão da superdotação como uma eficiência cognitiva e abordá-la de outra forma, extrapola conclusões das evidências empíricas, implicando em "teorias" sem validação científica. A inteligência é uma capacidade biológica, que reflete diferenças estruturais e integração de um núcleo de controle cortical frontoparietal, que têm forte componente genético ('inteligência potencial'), sendo a correlação genótipo-ambiente o processo pelo qual os genótipos se tornam fenótipos ('inteligência realizada').

Dada todas as informações reunidas, conclui-se que a etiologia da superdotação consiste em uma alta capacidade e eficiência cognitiva, alcançada por meio de um desenvolvimento cerebral atípico, que configura uma neurodivergência. Porém não é um transtorno do neurodesenvolvimento, uma vez que não é disfuncional e não traz prejuízos por si. Assim, a capacidade cognitiva geral é uma característica central da superdotação. A objetividade científica permitiu acumular evidências que nos mostram que a superdotação tem uma forte influência genética, não é uma construção social, uma vez que não é possível desenvolver alta capacidade cognitiva por meio de estímulos ou ambiente ideal⁶⁸.

Como a superdotação é uma diferença baseada no cérebro, não é possível a identificação por métodos subjetivos, como *checklist* de comportamentos ou desempenho acadêmico, que possuem viés cognitivo do avaliador. Estes até podem servir como uma triagem inicial e consequente encaminhamento para avaliação abrangente e criteriosa, pautada em conhecimento científico, onde fatores que vão além do desempenho escolar serão analisados. Por fim, sugere-se que a Neuropsicologia consiste na área mais adequada para conduzir a identificação de pessoas superdotadas, por meio da psicometria e bom raciocínio clínico baseado em Neurociência, devido aos instrumentos padronizados restritos e não-restritos disponíveis e maior domínio teórico do funcionamento cerebral.

REFERÊNCIAS

- 1.Coleman LJ. Point/counterpoint: Is consensus on a definition in the field possible, desirable, Necessary? *Roeper Rev* 2004;27:10-11. <https://doi.org/10.1080/02783190409554280>
- 2.Renzulli JS. What Makes Giftedness? Reexamining a Definition. *Phi Delta Kappan* 2011;92:81-8. <https://doi.org/10.1177/003172171109200821>
- 3.Gardner H. *Frames of mind: A theory of multiple intelligences*. New York: Basic Books, 1983.
- 4.Jolly JL. Historical Perspectives: Lewis Terman: Genetic Study of Genius—Elementary School Students. *Gift Child Today* 2008;31:27-33. <https://doi.org/10.4219/gct-2008-689>
- 5.Terman LM. *Genetic studies of genius: Volume I. Mental and physical traits of a thousand gifted children*. Redwood City: Stanford University Press, 1925.
- 6.Renzulli JS. What is This Thing Called Giftedness, and How Do We Develop It? A Twenty-Five Year Perspective. *J Educ Gifted* 1999;23:3-54. <https://doi.org/10.1177/016235329902300102>
- 7.Waterhouse L. Why multiple intelligences theory is a neuromyth. *Front Psychol* 2023;14:1217288. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1217288>
- 8.De Gucht V, Woestenburg DHA, Backbier E. Do gifted individuals exhibit higher levels of Sensory Processing Sensitivity and what role do openness and neuroticism play in this regard? *J Res Pers* 2023;104:104376. <https://doi.org/10.1016/j.jrp.2023.104376>
- 9.McClain MC, Pfeiffer S. Identification of Gifted Students in the United States Today: A Look at State Definitions, Policies, and Practices. *J Appl Sch Psychol* 2012;28:59-88. <https://doi.org/10.1080/15377903.2012.643757>
- 10.Silverman LK The measurement of giftedness. *In: Shavinina LV (ed). International Handbook on Giftedness*. Chapter 48. Springer Netherlands; 2009; pp.947-70. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2>
- 11.Silverman LK. Assessment of giftedness. *In: Pfeiffer SI (ed). Handbook of Giftedness in Children: Psychoeducational Theory, Research, and Best Practices*. Chapter 12. Springer International Publishing; 2018; pp.183-207. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77004-8_12
- 12.Government.no. Official Norwegian Reports (NOU) 2016: 14. More to gain: Students with higher learning potential. pp.19-21. (Acessado em: 08/04/2024). Disponível em: <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/nou-2016-14/id2511246/>
- 13.Terrasier JC. Intellectually precocious children. *Arch Pediatr* 2009;16:1603-6. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2009.07.019>
- 14.Vaivre-Douret L. Developmental and Cognitive Characteristics of “High-Level Potentialities” (Highly Gifted) Children. *Int J Pediatr* 2011;2011:420297. <https://doi.org/10.1155/2011/420297>
- 15.Deary IJ, Cox SR, Hill WD. Genetic variation, brain, and intelligence differences. *Mol Psychiatry* 2022;27:335-53. <https://doi.org/10.1038/s41380-021-01027-y>
- 16.Carman CA. Comparing Apples and Oranges: Fifteen Years of Definitions of Giftedness in Research. *J Adv Acad* 2013;24:52-70. <https://doi.org/10.1177/1932202x12472602>
- 17.McBee MT, Makel MC. The Quantitative Implications of Definitions of Giftedness. *AERA Open* 2019;5:1-13. <https://doi.org/10.1177/2332858419831007>
- 18.Guilmette TJ, Sweet JJ, Hebben N, Koltai D, Mahone EM, Spiegler BJ, et al. American Academy of Clinical Neuropsychology consensus conference

- statement on uniform labeling of performance test scores. *Clin Neuropsychol* 2020;34:437-53. <https://doi.org/10.1080/13854046.2020.1722244>
- 19.Crawford JR, Garthwaite PH. Percentiles Please: The Case for Expressing Neuropsychological Test Scores and Accompanying Confidence Limits as Percentile Ranks. *Clin Neuropsychol* 2009;23:193-204. <https://doi.org/10.1080/13854040801968450>
- 20.Pendarvis E, Howley C, Howley A. Renzulli's Triad: School to Work for Gifted Students. *J Educ Gifted* 1999;23:75-86. <https://doi.org/10.1177/016235329902300105>
- 21.Reis SM, Renzulli JS. Giftedness. In: Glăveanu VP (eds). *The Palgrave Encyclopedia of the Possible*. London: Palgrave Macmillan; 2022; pp.624-31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90913-0_54
- 22.Ruf DL. *5 Levels of Gifted: School Issues and Educational Options*. Tucson: Great Potential Press; 2009.
- 23.Torrijos-Muelas M, Sixto González-Víllora S, Bodoque-Osma AR. The Persistence of Neuromyths in the Educational Settings: A Systematic Review. *Front Psychol* 2021;11:591923. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.591923>
- 24.Gottfredson LS. Mainstream science on intelligence: An editorial with 52 signatories, history, and bibliography. *Intelligence* 1997;24:13-23. [https://doi.org/10.1016/s0160-2896\(97\)90011-8](https://doi.org/10.1016/s0160-2896(97)90011-8)
- 25.Ducan J, Seitz RJ, Kolodny J, Bor D, Herzog H, Ahmed A, *et al.* A Neural Basis for General Intelligence. *Science* 2000;289:457-60. <https://doi.org/10.1126/science.289.5478.457>
- 26.Duncan J, Assem M, Shashidhara S. Integrated Intelligence from Distributed Brain Activity. *Trends Cogn Sci* 2020;24:838-52. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2020.06.012>
- 27.Basten U, Hilger K, Fiebach CJ. Where smart brains are different: A quantitative meta-analysis of functional and structural brain imaging studies on intelligence. *Intelligence* 2015;51:10-27. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2015.04.009>
- 28.Trzaskowski M, Yang J, Visscher P, Plomin R. DNA evidence for strong genetic stability and increasing heritability of intelligence from age 7 to 12. *Mol Psychiatry* 2014;19:380-4. <https://doi.org/10.1038/mp.2012.191>
- 29.Mollon J, Knowles EEM, Mathias SR, Gur R, Peralta JM, Weiner DJ, *et al.* Genetic influence on cognitive development between childhood and adulthood. *Mol Psychiatry* 2021;26:656-65. <https://doi.org/10.1038/s41380-018-0277-0>
- 30.Deary IJ, Yang J, Davies G, Harris SE, Tenesa A, Liewald D. *et al.* Genetic contributions to stability and change in intelligence from childhood to old age. *Nature* 2012;482:212-5. <https://doi.org/10.1038/nature10781>
- 31.Hulshoff Pol HE, Schnack HG, Posthuma D, Mandl RCW, Baaré WF, van Oel C, *et al.* Genetic Contributions to Human Brain Morphology and Intelligence. *J Neurosci* 2006;26:10235-42. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1312-06.2006>
- 32.Haier RJ, White NS, Alkire MT. Individual differences in general intelligence correlate with brain function during nonreasoning tasks. *Intelligence* 2003;31:429-41. [https://doi.org/10.1016/s0160-2896\(03\)00025-4](https://doi.org/10.1016/s0160-2896(03)00025-4)
- 33.Cantlon JF, Libertus ME, Pinel P, Dehaene S, Brannon EM, Pelphey KA. The Neural Development of an Abstract Concept of Number. *J Cogn Neurosci* 2009;21:2217-29. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21159>
- 34.De Cruz H. Why are some numerical concepts more successful than others? An evolutionary perspective on the history of number concepts. *Evol*

- Hum Behav 2006;27:306-23.
<https://doi.org/10.1016/j.evolhumbehav.2006.02.001>
- 35.Emerson RW, Cantlon JF. Early math achievement and functional connectivity in the fronto-parietal network. *Dev Cogn Neurosci* 2012;2:S139-51. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.11.003>
- 36.O'Muircheartaigh J, Dean DC, Dirks H, Waskiewicz N, Lehman K, Jerskey BA, *et al.* Interactions between white matter asymmetry and language during neurodevelopment. *J Neurosci* 2013;33:16170-7. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1463-13.2013>
- 37.Kooijman V, Junge C, Johnson EK, Hagoort P, Cutler A. Predictive brain signals of linguistic development. *Front Psychol* 2013;4:25. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00025>
- 38.Prat CS, Keller TA, Just MA. Individual Differences in Sentence Comprehension: A Functional Magnetic Resonance Imaging Investigation of Syntactic and Lexical Processing Demands. *J Cogn Neurosci* 2007;19:1950-63. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.12.1950>
- 39.Jung RE, Haier RJ. The parieto-frontal integration theory (P-FIT) of intelligence: Converging neuroimaging evidence. *Behav Brain Sci* 2007;30:135-54. <https://doi.org/10.1017/S0140525X07001185>
- 40.Assem M, Glasser MF, Van Essen DC, Duncan J. A Domain-general Cognitive Core defined in Multimodally Parcellated Human. *Cereb Cortex* 2020;30:4361-80. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa023>
- 41.Suprano I, Kocevar G, Stamile C, Hannoun S, Fournier P, Revol O, *et al.* White matter microarchitecture and structural network integrity correlate with children intelligence quotient. *Sci Rep* 2020;10:20722. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76528-x>
- 42.Davies G, Tenesa A, Payton A, Yang J, Harris SE, Liewald D, *et al.* Genome-wide association studies establish that human intelligence is highly heritable and polygenic. *Mol Psychiatry* 2011;16:996-1005. <https://doi.org/10.1038/mp.2011.85>
- 43.Thompson P, Cannon T, Narr K, van Erp T, Poutanen VP, Huttunen M, *et al.* Genetic influences on brain structure. *Nat Neurosci* 2001;4:1253-8. <https://doi.org/10.1038/nn758>
- 44.Posthuma D, De Geus EJC, Baaré WFC, Hulshoff Pol HE, Kahn RS, Boomsma DI. The association between brain volume and intelligence is of genetic origin. *Nat Neurosci* 2002;5:83-4. <https://doi.org/10.1038/nn0202-83>
- 45.Savage JE, Jansen PR, Stringer S, Watanabe K, Bryois J, Leeuw CA, *et al.* Genome-wide association meta-analysis in 269,867 individuals identifies new genetic and functional links to intelligence. *Nat Genet* 2018;50:912-9. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0152-6>
- 46.Goriounova NA, Mansvelder HD. Genes, cells and brain areas of intelligence. *Front Hum Neurosci* 2019;13:44. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00044>
- 47.Chen TT, Kim J, Lam M, Chuang YF, Chiu YL, Lin SC, *et al.* Shared genetic architectures of educational attainment in East Asian and European populations. *Nat Hum Behav* 2024;8:562-75. <https://doi.org/10.1038/s41562-023-01781-9>
- 48.Judd N, Sauce B, Wiedenhoeft J, Tromp J, Chaarani B, Schliep A, *et al.* Cognitive and brain development is independently influenced by socioeconomic status and polygenic scores for educational attainment. *PNAS* 2020;117:12411-8. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001228117>

- 49.Jansen PR, Nagel M, Watanabe K, Wei Y, Savage JE, Leeuw CA, *et al.* Genome-wide meta-analysis of brain volume identifies genomic loci and genes shared with intelligence. *Nat Commun* 2020;11:5606. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19378-5>
- 50.Coleman JRI, Bryois J, Gaspar HA, Jansen PR, Savage JE, Skene N, *et al.* Biological annotation of genetic loci associated with intelligence in a meta-analysis of 87,740 individuals. *Mol Psychiatry* 2019;24:182-97. <https://doi.org/10.1038/s41380-018-0040-6>
- 51.Driessens SLW, Galakhova AA, Heyer DB, Pieterse IJ, Wilbers R, Mertens EJ, *et al.* Genes associated with cognitive ability and HAR show overlapping expression patterns in human cortical neuron types. *Nat Commun* 2023;14:4188. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39946-9>
- 52.Vareilles H, Rivière D, Mangin JF, Dubois J. Development of cortical folds in the human brain: An attempt to review biological hypotheses, early neuroimaging investigations and functional correlates. *Dev Cogn Neurosci* 2023;61:101249. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101249>
- 53.Dubois J, Benders M, Borradori-Tolsa C, Cachia A, Lazeyras F, Leuchter RH, *et al.* Primary cortical folding in the human newborn: an early marker of later functional development. *Brain* 2008;131:2028-41. <https://doi.org/10.1093/brain/awn137>
- 54.Bae B, Tietjen I, Atabay KD, Evrony GD, Johnson MB, Asare E, *et al.* Evolutionarily Dynamic Alternative Splicing of GPR56 Regulates Regional Cerebral Cortical Patterning. *Science* 2014;343:764-8. <https://doi.org/10.1126/science.1244392>
- 55.Rapoport J, Gogtay N. Brain Neuroplasticity in Healthy, Hyperactive and Psychotic Children: Insights from Neuroimaging. *Neuropsychopharmacol* 2009;33:181-97. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1301553>
- 56.Knudsen EI. Sensitive Periods in the Development of the Brain and Behavior. *J Cogn Neurosci* 2004;16:1412-25. <https://doi.org/10.1162/0898929042304796>
- 57.Bruzzzone SEP, Lumaca M, Brattico E, Vuust P, Kringelbach ML, Bonetti L. Dissociated brain functional connectivity of fast versus slow frequencies underlying individual differences in fluid intelligence: a DTI and MEG study. *Sci Rep* 2022;12:4746. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08521-5>
- 58.Aubry A, Gonthier C, Bourdin B. Explaining the high working memory capacity of gifted children: Contributions of processing skills and executive control. *Acta Psychol* 2021;218:103358. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2021.103358>
- 59.Aubry A, Bourdin B. Alerting, orienting, and executive control in intellectually gifted children. *Brain Behav* 2021;11:e02148. <https://doi.org/10.1002/brb3.2148>
- 60.Fabio RA, Croce A, Calabrese C. Critical Thinking in Ethical and Neutral Settings in Gifted Children and Non-Gifted Children. *Children* 2023;10:74. <https://doi.org/10.3390/children10010074>
- 61.Deary IJ, Penke L, Johnson W. The neuroscience of human intelligence differences. *Nat Rev Neurosci* 2010;11:201-11. <https://doi.org/10.1038/nrn2793>
- 62.Estrada E, Ferrer E, Román FJ, Karama S, Colom R. Time-lagged associations between cognitive and cortical development from childhood to early adulthood. *Dev Psychol* 2019;55:1338-52. <https://doi.org/10.1037/dev0000716>

- 63.Song M, Zhou Y, Li J, Liu Y, Tian L, Yu C, *et al.* Brain spontaneous functional connectivity and intelligence. *NeuroImage* 2008;41:1168-76. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.02.036>
- 64.Shaw P, Greenstein D, Lerch J, Clasen L, Lenroot R, Gogtay N, *et al.* Intellectual ability and cortical development in children and adolescents. *Nature* 2006;440:676-9. <https://doi.org/10.1038/nature04513>
- 65.Schnack HG, van Haren NEM, Brouwer RM, Evans A, Durston S, Boomsma DI, *et al.* Changes in thickness and surface area of the human cortex and their relationship with intelligence. *Cereb Cortex* 2015;25:1608-17. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht357>
- 66.Tadayon E, Pascual-Leone A, Santarnecchi E. Differential contribution of cortical thickness, surface area, and gyrification to fluid and crystallized intelligence. *Cereb Cortex* 2020;30:215-25. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz082>
- 67.Kuhn T, Blades R, Gottlieb L, Knudsen K, Ashdown C, Martin-Harris L, *et al.* Neuroanatomical differences in the memory systems of intellectual giftedness and typical development. *Brain Behav* 2021;11:e2348. <https://doi.org/10.1002/brb3.2348>
- 68.Haier RJ. *Neuroscience of Intelligence*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2023.