COMO O CÉREBRO DO MATEMÁTICO FUNCIONA?
Uma Introdução à Neurociência da Matemática Avançada

Manoel de Campos Almeida[1]

RESUMO

O presente estudo visa propiciar uma visão introdutória sobre a neurociência da matemática avançada, ou seja, como o cérebro do matemático funciona. Serão discutidas: as origens das habilidades matemáticas; as redes neurais da matemática avançada serão comparadas com as do conhecimento semântico geral; investigar-se-á se elas independem das redes que processam tanto a linguagem falada como escrita, bem como se elas se interrelacionam com as redes evolucionárias de processamento de números; discutir-se-á as origens da abstração.

Palavras-chave: Matemática Avançada, Neurociência, História da Matemática.

1.0 PREÂMBULO

O presente estudo tem caráter introdutório, visa fornecer uma visão panorâmica dos avanços recentes da neurociência para matemáticos, estudantes e demais interessados nesta ciência, sobre como o cérebro processa a matemática avançada. Portanto, poupar-se-ão detalhes minuciosos dos estudos, tanto anatômicos como metodológicos, de interesse apenas dos especialistas, os quais poderão ser compulsados nas referências.

Maiores detalhes, tanto anatômicos como acerca das técnicas empregadas podem ser compulsados em nossas obras anteriores (Almeida, 2020 a, b, c).

Há muito tempo se debate sobre as origens das habilidades matemáticas dos humanos, se elas são fundamentadas em competências linguísticas ou em antigos circuitos neurais para números e espaço.

Essa discussão é sumamente importante para a História da Matemática, pois envolve a compreensão de como a matemática se originou, de como ela se erige sobre seus mais primordiais e básicos fundamentos. Permite entendermos no que se constituía a *Ur-Mathematik*, a matemática primeva, cujos fundamentos

[1] UFPR; PUCPR – Emeriti. manoel1748@gmail.com

se tornaram partes estruturantes da mente humana. Emprestamos o prefixo *Ur-* do alemão, onde significa primitivo, primeiro, original (Almeida, 2011, 2017, 2019).

Características que começam a distinguir a espécie *Homo* dos outros primatas aparecem no Paleolítico, entre elas provavelmente o surgimento de uma linguagem, fator essencial para a comunicação.

Para os linguistas, como Noam Chomski (2006): "a origem da capacidade matemática repousa na abstração de operações linguísticas". Contudo, alguns matemáticos e físicos arguem em outra direção; de particular importância é a afirmação de Albert Einstein; "Palavras e linguagem, escritas ou faladas, não parecem desempenhar nenhuma parte nos meus processos mentais".

Com o avanço das modernas técnicas de neuroimagem uma alternativa à hipótese da linguagem surgiu, de acordo com a qual a matemática emergiu de uma abstração sobre intuições evolucionárias não linguísticas de número, espaço e tempo. Graças aos avanços da neurociência, propiciados pelas tecnologias modernas, essa alternativa vem se mostrado elucidadora.

Vários trabalhos que investigaram a neurofisiologia envolvida no processamento de numerosidades e de operações aritméticas básicas surgiram nessas duas últimas décadas, contudo, raríssimos se debruçaram sobre como o cérebro dos matemáticos trata a matemática avançada. De relevante importância foi o desenvolvido por Marie Amalric e Stanislas Dehaene (2016), sobre o qual será dedicado particular interesse.

Para identificar quais sistemas neurais subsidiam a matemática avançada, esses pesquisadores escanearam matemáticos profissionais de alto nível, o que torna este estudo particularmente relevante, bem como profissionais de mesmo grau acadêmico, mas sem conhecimentos de matemática avançada, como grupo de controle, enquanto os mesmos avaliavam a veracidade ou falsidade de afirmações de matemática avançada e de conhecimentos gerais.

Para o escaneamento dos cérebros dos participantes foi empregado a Ressonância Magnética Funcional. A Ressonância Magnética Funcional (fMRI) é um tipo de scanner de MRI (Magnetic Resonance Imaging) especializado na medição da resposta hemodinâmica (mudanças no fluxo de sangue) relacionadas à atividade neural no cérebro ou na medula espinhal. Vem dominando a neuroimagem, pois é relativamente não invasiva, não emprega exposição à radiação ionizante, e acessível.

Participaram do estudo 15 matemáticos profissionais e 15 não matemáticos, porém do mesmo nível acadêmico, como grupo de controle. Em cada sessão, uma sentença falada curta era seguida por um período de 4 s de reflexão, para então o participante decidir se ela era verdadeira (V), falsa (F) ou sem significado (I).

Quatro domínios da matemática avançada foram escolhidos: análise, álgebra, topologia e geometria. Para cada grupo foram selecionadas sentenças verdadeiras, falsas e indeterminadas. Além dessas, como controle, foram selecionadas afirmações verdadeiras, falsas e indeterminadas de conhecimento geral sobre história e natureza, de mesma complexidade e comprimento.

Além dessas, duas sessões adicionais de fMRI foram realizadas visando avaliar o processamento de sentenças e de cálculos, bem como o reconhecimento visual de faces, corpos, casas números, letras e sentenças matemáticas escritas.

As afirmações sobre matemática avançada foram elaboradas por um grupo de matemáticos profissionais. Tomou-se cuidado para que as questões tanto matemáticas como não matemáticas tivessem o mesmo nível de dificuldade objetiva, o que foi comprovado estatisticamente.

As questões, tanto as matemáticas como as não matemáticas, apresentavam um nível bastante elevado, como mostraremos com os seguintes exemplos: a) análise: qualquer função polinomial de R em R é polinomial (V); uma desigualdade entre duas funções permanece válida para suas primitivas (F); O topológico dual de uma série de Fourier admite uma continuação analítica (I); álgebra: uma matriz quadrada com coeficientes em um domínio ideal principal é invertível se e somente se seu determinante é invertível (V); existe um grupo de ordem 169 cujo centro é reduzido a um elemento (F); qualquer anel quadrado invertível admite uma expansão hexadecimal (I); topologia: o contorno do conjunto de Cantor é igual a si mesmo (V); qualquer bijeção continua entre dois espaços de Hausdorff é um homeomorfismo (F); toda medida finita em uma álgebra de Hopf é localmente modelada na medida de Haar (I); geometria: o grupo euclidiano ortogonal tem exatamente dois componentes conectados (V); uma função holomórfica em uma superfície de Riemann é constante (F); o conjunto de pontos equidistantes de duas superfícies de Riemann é compatível com um parabolóide (I); afirmações não matemáticas: o conceito de robôs e avatares já estava presente na mitologia grega (V); o fim do Concílio de Trento coincide com a queda do Império Romano Ocidental (F); a maioria dos touros robôs nunca encontrou a Iugoslávia (I).

Em todas as afirmações foram inicialmente evitados tanto o emprego de números como expressões que os envolvam, para evitar superposições com estudos sobre numerosidades ou com o sistema de números aproximados.

Muitas das estruturas anatômicas cerebrais mencionadas no presente estudo podem ser visualizadas na Fig. 1.

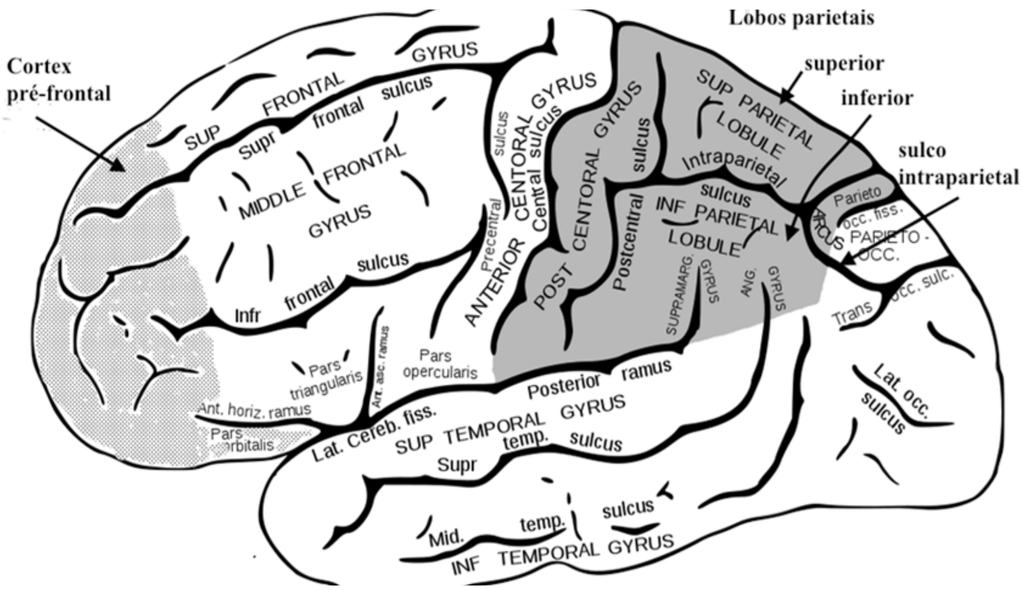
2. CONTRIBUIÇÕES DOS ESTUDOS DE ALMARIC & DEHAENE

Várias baterias de testes foram realizadas e avaliadas estatisticamente. Inicialmente investigou-se se existem áreas distintas do cérebro responsáveis ou pela competência matemática avançada ou pelo conhecimento semântico geral.

A análise das imagens de fMRI de todo o cérebro dos matemáticos profissionais apresentou os seguintes resultados: a Fig. 2 - A mostra quais as áreas ativadas durante o período de pensamento/reflexão sobre afirmações matemáticas (azul), que denotam expertise matemático, quando comparadas com as de conhecimento geral (verde).

No grupo dos matemáticos profissionais notou-se uma maior ativação das áreas envolvendo o sulco intraparietal bilateral (IPS), as regiões bilaterais temporais inferiores (IT), o córtex pré-frontal (PFC), dorsolateral, medial e superior e o cerebelo. Todos os quatro domínios da matemática avançada ativaram essas regiões.

Fig. 1. Estruturas anatômicas

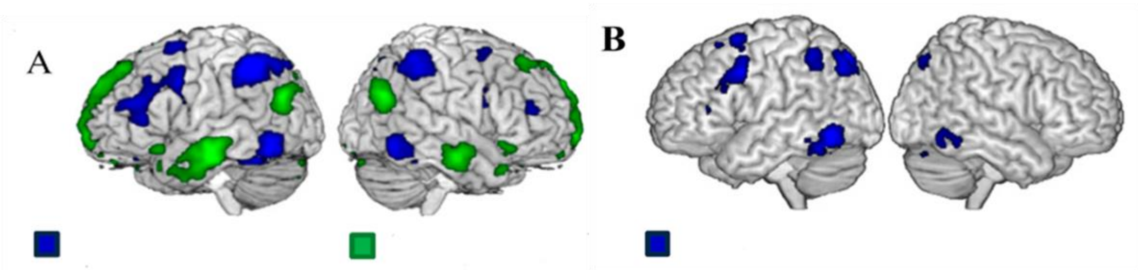


Fonte: Almeida & Justino, 2020.

No grupo dos matemáticos profissionais notou-se uma maior ativação das áreas envolvendo o sulco intraparietal bilateral (IPS), as regiões bilaterais temporais inferiores (IT), o córtex pré-frontal (PFC), dorsolateral, medial e superior e o cerebelo. Todos os quatro domínios da matemática avançada ativaram essas regiões.

A Fig. 2-B mostra, em imagens de todo o cérebro, as áreas onde a competência matemática foi patente, não havendo interação com áreas de domínio de conhecimento geral. Portanto, existem áreas onde a competência matemática avançada é distinta das áreas responsáveis pelo conhecimento geral.

Fig. 2 Imagens de todo o cérebro.



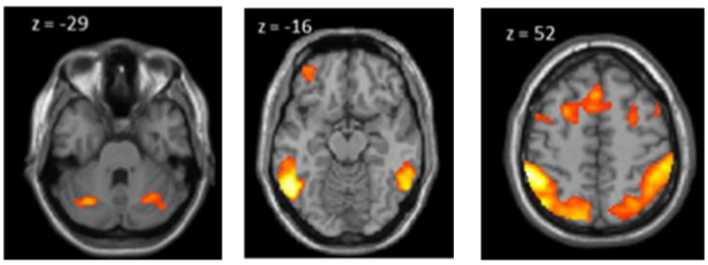
A: imagens de todo o cérebro ativadas durante o período de reflexão sobre afirmações matemáticas (azul) quando comparadas com conhecimento geral (verde). **B**: efeito de competência matemática: interação indicando uma diferença maior entre afirmações matemáticas significativas e afirmações não matemáticas em matemáticos (azul). do que em controles.

Fonte:. Almaric, 2016.

Na Fig. 3 encontramos imagens de secções axiais do cérebro mostrando áreas ativadas quando matemáticos profissionais pensam em problemas matemáticos. Essas áreas são comuns todos os domínios de matemática avançada estudados, todavia, cabe indagar se ativação dessas áreas é a mesma para os quatro domínios.

As maiores ativações para matemática avançada com significado (verdadeiras) foram novamente vistas no temporal inferior bilateral (IT), no sulco intraparietal bilateral (IPS), no posterior frontal superior direito, no lateral esquerdo IFG, no giro frontal médio, enquanto que ativações mais fortes para sentenças não matemáticas significativas estavam no sulco temporal superior direito (pSTS) /AG, bilateral anterior e ventro medial e no córtex pre-frontal PFC.

Fig. **3** Secções axiais mostrando áreas ativadas pela reflexão matemática em matemáticos profissionais.



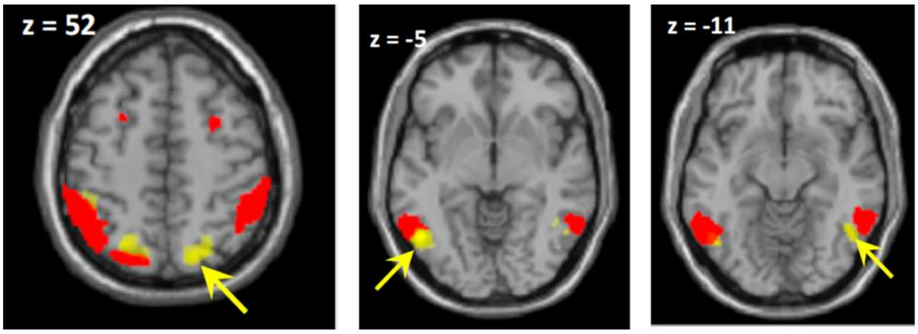
Fonte: Almaric, 2016.

Na sequência investigou-se se os quatro domínios da matemática avançada são processados nas mesmas áreas cerebrais.

A Fig. 4 mostra em vermelho as áreas cerebrais comuns aos domínios de análise, álgebra, topologia e geometria. Contudo, a ativação dessas áreas pode variar conforme o domínio da matemática.

A única diferença detectável foi uma ativação (em amarelo, Fig. 4) na região temporal posterior e no sulco intraparietal, acionada quando problemas de geometria são comparados com problemas não geométricos, bem como no sulco intraocipital para problemas considerados como fáceis de visualizar. Todos os quatro domínios ativam as regiões em vermelho, mas só a geometria ativa a área em amarelo.

Fig. 4 Áreas corticais.



Áreas corticais onde há respostas comuns (vermelho) ou diferentes (amarelo) entre os domínios de análise, álgebra, topologia e geometria

.Fonte. Almaric, 2016.

Isso mostra que as áreas dedicadas ao processamento da matemática avançada são praticamente as mesmas nos quatro domínios estudados, exceção feita à geometria, onde a superposição é apenas parcial. Isso talvez ocorra devido a que a geometria é a que desses domínios a que mais recorre a visualizações, mas isso ainda necessita ser melhor investigado.

Passou-se então a investigar a hipótese de Chomski, isto é, se a origem da capacidade matemática repousa na abstração de operações linguísticas. Para isso, testou-se se existem relações entre as redes neurais da matemática e da linguagem, tanto falada como escrita, esta entendida por meio da leitura.

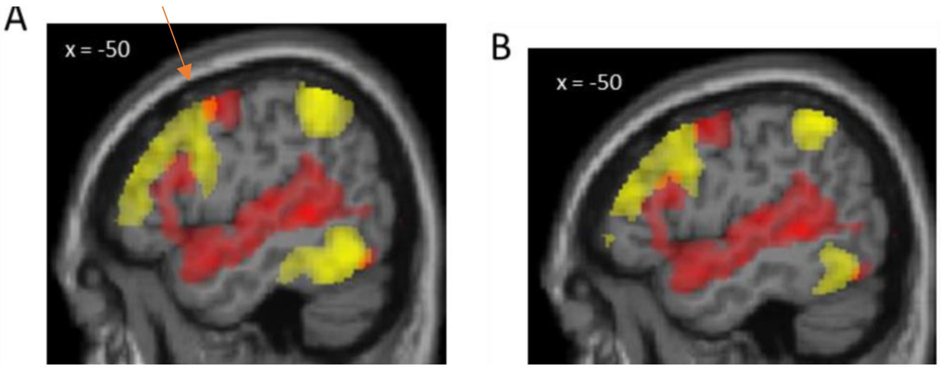
As redes neurais para a linguagem falada e escrita já eram conhecidas e tinham sido objeto de outros estudos (Almeida & Justino, 2020).

As secções sagitais (Fig. 5) mostram os contornos da rede neural matemática no lobo frontal, em vermelho, comparadas com o contorno da rede neural para a linguagem falada e escrita, em amarelo. A rede neural da leitura é a que interpreta a linguagem escrita.

As imagens mostram que a rede neural da matemática (em amarelo) não se superpõe com a rede neural dedicada à linguagem, tanto falada como escrita, exceto por uma área indicada em laranja no córtex frontal superior. Contudo, isso sugere que pode haver algum grau de compartilhamento entre a rede matemática e a da linguagem, o que exige estudos posteriores.

As secções sagitais (Fig. 5) mostram os contornos da rede neural matemática no lobo frontal, em vermelho, comparadas com o contorno da rede neural para a linguagem falada e escrita, em amarelo. A rede neural da leitura é a que interpreta a linguagem escrita.

Fig. 5 Relações espaciais entre as redes neurais da matemática e da linguagem, tanto falada como escrita.



Fonter:. Almaric, 2016.

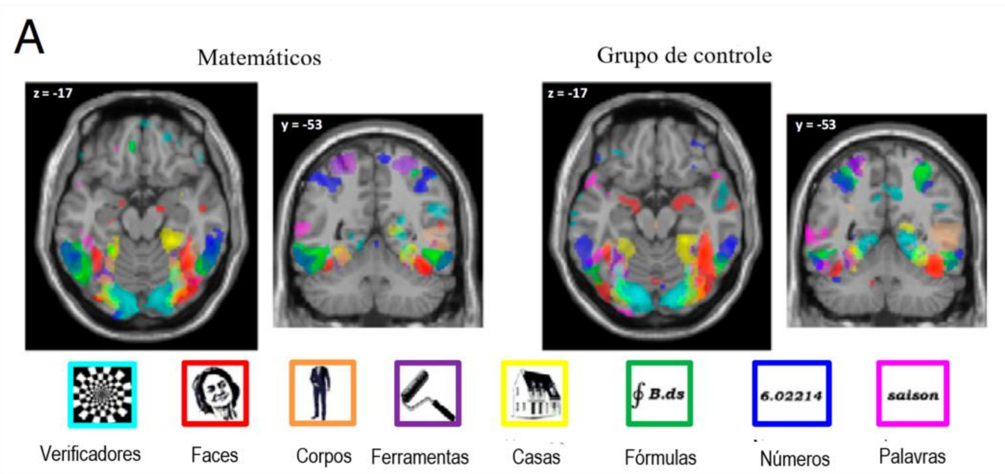
Essas constatações sugerem que a matemática não repousa integralmente sobre abstrações de origem linguística, como supôs Chomski, o que foi confirmado por outros estudos, como veremos na sequência.

Passou-se então a investigar as conexões entre a rede neural responsável pela matemática com a rede visual. A Fig. 6 mostra as áreas cerebrais preferidas por diferentes categorias visuais (faces, casas, números, fórmulas, etc.) no córtex visual central.

No cérebro dos matemáticos constatou-se uma maior ativação para fórmulas no córtex ventral esquerdo occipital-temporal. Também foi encontrada uma ativação forte relacionada a números nas regiões bilaterais do giro temporal inferior, correspondente às áreas visuais esquerda e direita das áreas relacionadas com formas de números.

Para números, contudo, nenhuma diferença significante entre os grupos dos matemáticos avançados e o grupo de controle foi encontrada, quando empregada uma análise de todo o cérebro. Isso aponta para um núcleo comum de intuições evolucionárias não linguísticas de número, tanto para matemáticos como para os demais.

Fig. 6 Comparação da ativação de diversas áreas em resposta a estímulos visuais



Fonte: Almaric, 2016.

Até esse ponto a investigação cuidadosamente evitava qualquer menção a números, sendo as sentenças matemáticas rigorosamente escolhidas para tal.

Agora, todavia, cumpre investigar se as áreas da matemática avançada igualmente repousavam sobre as mesmas áreas neurais responsáveis pelo processamento de números nos cérebros humanos.

Presentemente defende-se que tanto animais como humanos podem possuir dois diferentes sistemas não verbais para representar valores numéricos.

O primeiro sistema (OFM - Object-File Model) representa precisamente números pequenos (até 3 ou 4), sendo cada objeto a ser enumerado em um conjunto representado por um único símbolo. Numerosidades (ou o senso numérico) são explicadas por esse sistema. Como a representação da quantidade é exata, animais empregando esse modelo não seguem a lei de Weber-Fechner ou mostram efeitos de razão.

No segundo sistema, denominado de sistema de números aproximados (ANS - Approximate Number System), animais e humanos representam aproximadamente números maiores e também possivelmente números menores. Nesse sistema quantidades são representadas como magnitudes mentais, ou seja, não simbólicas, estando sujeitas a efeitos de razão; portanto, quantidades usando este sistema seguem a lei de Weber-Fechner (Benson-Amram, 2017; Anobile, 2018; Almeida, 2020; et al.).

A lei de Weber estatui que a diferença perceptível entre o tamanho de dois estímulos depende mais da razão entre as suas duas magnitudes do que das suas diferenças absolutas. Gustav Theodor Fechner (1801-1887) aperfeiçoou a Lei de Weber, estabelecendo que a sensação subjetiva é proporcional ao logaritmo da intensidade do estímulo.

Uma consequência da Lei de Weber-Fechner é que a habilidade para discriminar entre dois valores de estímulo depende mais na sua razão do que dos seus valores absolutos. Essa fração, conhecida como fração de Weber, relaciona S, um estímulo em um instante considerado, com S_0, um estímulo inicial. Portanto, a sensação subjetiva é proporcional à fração S/S_0, ou melhor, ao logaritmo dessa fração (Almeida, 2017, 2019).

As investigações de Almaric & Dehaene mostraram que as ativações ocorridas quando reflexões/pensamentos sobre matemática avançada eram efetuadas também ativavam áreas previamente conhecidas pela codificação de números, tanto em animais como em humanos. As regiões bilaterais intraparientais e dorsal préfrontal eram igualmente ativadas durante uma variedade de cálculos e processamento numéricos e continham neurônios sintonizados com quantidades numéricas.

Logo, tanto a matemática avançada como cálculos e processamentos numéricos empregam as mesmas redes neurais, ou seja, a matemática avançada tem sua origem igualmente em circuitos neurais de origem evolucionária, componentes da *Ur-Mathematik.*

Dessa forma comprovou-se que os domínios investigados (análise, álgebra, topologia e geometria) empregam uma rede bilateral das regiões pré-frontal, parietal e temporal inferior, a qual também é ativada quando tanto matemáticos como não matemáticos reconhecem e manipulam números mentalmente

3. COMPROVAÇÕES ADICIONAIS SOBRE A INDEPENDÊNCIA DAS REDES NEURAIS MATEMÁTICAS DAS REDES DA LINGUAGEM

Matemática e leitura (ou seja, a interpretação da linguagem escrita), envolvem redes cerebrais distribuídas e ambas têm componentes cognitivos tanto compartilhados (e.g. codificação de estímulos visuais) como dissociados (e.g. processamento de quantidades, números).

Até o presente, desconhecem-se quais são as redes de matemática e de leitura com substratos de matéria (ou substância) cinza e de matéria branca, que são compartilhadas e quais são as dissociadas.

Todavia, estudos do grupo de pesquisa coordenado por Mareike Grotheer, em 2018, forneceram alguns resultados preliminares sobre essas questões. Os estudos de Grotheer sobre atividades matemáticas limitaram-se à adição de pequenos números, contudo, ajudam a confirmar os resultados de Almaric e Dehaene de 2016 sobre a separação da rede neural matemática da rede da linguagem, embora utilizando técnicas diferentes, notadamente pelo emprego da tractografia.

Desnecessário frisar a importância das competências tanto de leituras como matemáticas no aprendizado. Contudo, seu substrato neurológico ainda é pouco conhecido e pesquisas nessa direção são de valor inestimável para a pedagogia.

É possível perceber no sistema nervoso central duas porções com colorações distintas: uma porção com a coloração mais acinzentada e outra com uma região mais esbranquiçada. A região acinzentada recebe o nome de substância (ou matéria) cinzenta, e a região esbranquiçada recebe o nome de substância branca.

A substância cinzenta é formada por uma grande quantidade de corpos celulares de neurônios. Já a substância branca é formada por uma porção de prolongamentos de neurônios, em especial os axônios. Como os axônios de alguns neurônios apresentam-se envolvidos por mielina, essa substância dá um aspecto esbranquiçado à substância branca.

Um tracto é feixe de fibras nervosas com aproximadamente a mesma origem, mesma função e mesmo destino. Fascículos são feixes de fibras, de tractos, que são as vias de associação cortical.

Na neurociência, a tractografia é uma técnica de modelagem 3D usada para representar visualmente os tractos nervosos usando dados coletados por ressonância magnética de difusão. Ela usa técnicas especiais de ressonância magnética (RM) e ressonância magnética baseada em computador. Os resultados são apresentados em imagens bidimensionais e tridimensionais chamadas tractogramas.

Alguns dos resultados de Grotheer revelaram que: a) há distintas regiões de matéria cinza as quais são preferencialmente engajadas em: ou competências matemáticas ou competências em leitura; b) o fascículo longitudinal superior (SLF) e o fascículo arqueado (AF) são compartilhados por redes de matemática e de leitura.

Surpreendentemente, dentro desses fascículos existem tractos relacionados tanto com leitura como matemática, que estão separados em sub-feixes paralelos e mostram diferenças estruturais relativas à sua mielinação (Grotheer, 2018).

Embora leitura e matemática sejam encaradas como competências distintas, elas compartilham diversos processos cognitivos, tais como: codificação de estímulos visuais, verbalização e memória de trabalho. Admite-se que as ativações das redes cerebrais compartilhadas dependem da tarefa aritmética, por exemplo, são mais ativadas quando é necessário recuperarem fatos (e.g., durante a adição de números pequenos) do que quando executam cálculo baseados em procedimentos (algoritmos).

Além disso, existe uma notável taxa de co-morbidade entre deficiências comuns entre matemática e leitura: 66 % das crianças que sofrem de discalculia também padecem de dislexia, o que sugere que matemática e leitura podem ter substratos neurais compartilhados (id.).

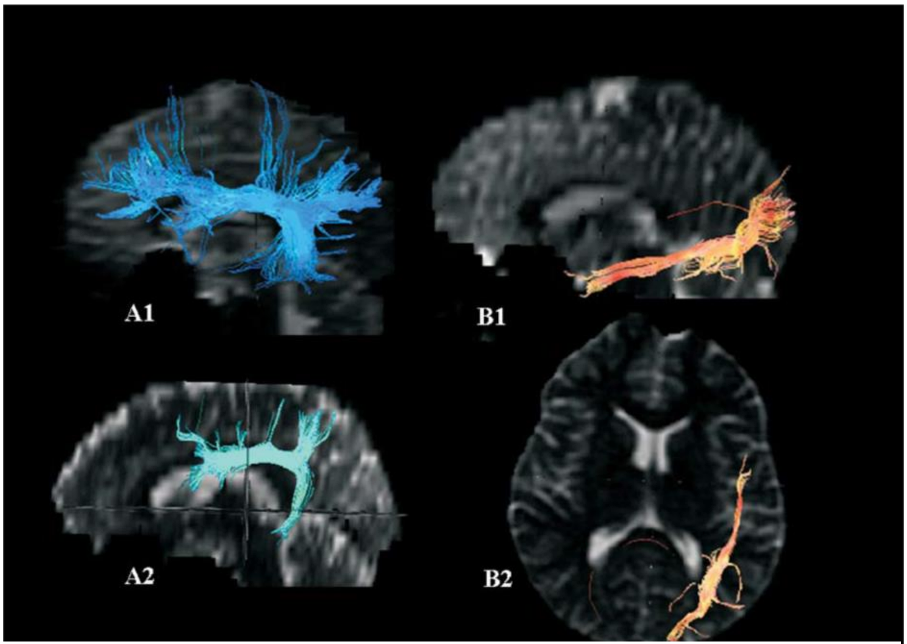
Pesquisas indicaram que diversos fascículos de matéria branca são importantes para a leitura. Entre eles encontram-se: a) o fascículo arqueado, que conecta os córtices frontal e temporal; b) o fascículo fronto-ocipital inferior (IFOF), que também conecta os córtices frontal e occipital; c) o fascículo longitudinal inferior (ILF), que conecta o lobo occipital com a ponta anterior do lobo temporal. Contudo, o compartilhamento desses fascículos com atividades matemáticas era pouco conhecido até os estudos de Grotheer.

Esses estudos mostram novas visões sobre as redes de fascículos da leitura e da matemática. Primeiro, mostram que o fascículo longitudinal superior (SLF) e fascículo arqueado (AF) são compartilhados entre as redes de leitura e de matemática. Segundo, que mesmo como o SLF e o AF são fascículos chaves para ambas competências, cada um contém sub-feixes especializados para leitura ou matemática. Esses sub-feixes distintos sugerem que possivelmente as conexões da matéria branca para leitura e matemática são mais espacialmente específicas do que previamente imaginado (id.).

Isso pode acarretar que, se mesmo que os processos cognitivos de matemática e leitura são compartilhados, seu processamento é efetuado principalmente em paralelo. Logo, melhorias em uma habilidade não necessariamente são transmitidas à outra.

Sabe-se que a mielinização é dependente da atividade neural e que, como a leitura é praticada mais intensamente que a matemática durante a infância, esses estudos levantam a intrigante possibilidade de que a prática mais ativa de leitura pode afetar mais a mielinização de seus tratos, em detrimento da dos feixes matemáticos (id.).

Fig. 7. A1: fascículo longitudinal superior (SLF); sagital; A2: fascículo arqueado (AF); sagital; B1: fascículo longitudinal inferior; sagital; B2: fascículo longitudinal inferior; axial. Cf.: Eliasz Engelhardt; Denise M Moreira. A substância branca cerebral. Dissecção virtual dos principais feixes: tratografia..



Fonte: Revista Brasileira de Neurologia » Volume 44 » No 4 » out - nov - dez, 2008

A função da mielina é de proteger o axônio. Além disso, ela também acelera a velocidade da condução dos impulsos nervosos. Se a bainha de mielina que envolve a fibra nervosa for lesada ou destruída, os impulsos nervosos se tornam cada vez mais lentos ou não são transmitidos. Portanto, mielinização atípicas dos tractos dentro do SLF e do AF durante o desenvolvimento das crianças podem estar associados com deficiências de aprendizado de leitura ou matemática.

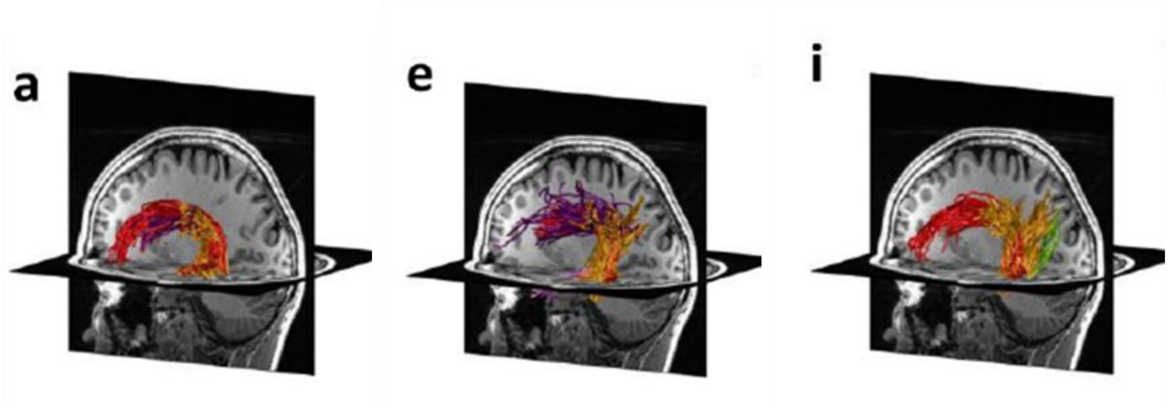


Fig. 8 a) Fascículos dedicados à leitura; e) fascículos dedicados à matemática; i) fascículos compartilhados entre a leitura e a matemática. Fonte: Grotheer, 2018.

Na Fig. 8 podem-se identificar os fascículos dedicados à leitura (a), ou seja, a interpretação da linguagem escrita, bem como os fascículos dedicados à matemática (b) e os fascículos compartilhados entre elas, que gerenciam áreas comuns tais como: codificação de estímulos visuais, verbalização e memória de trabalho.

Os estudos de Grotheer (2018) sobre atividades matemáticas limitaram-se à adição de pequenos números, mas complementam e atualizam os estudos de Almaric & Dehaene (2016) sobre a matemática avançada de matemáticos profissionais. Ambos mostram a independência da rede neural de processamento da matemática da rede da linguagem.

4. CONCLUSÕES

Embora a neurociência da matemática esteja apenas tateando seus primeiros passos e muito resta a investigar, alguns de seus estudos já revelam contribuições significativas.

As investigações de Almaric & Dehaene (2016), que envolveram o escaneamento das atividades cerebrais de matemáticos profissionais enquanto refletiam sobre matemática avançada, apontaram que o raciocínio da matemática de alto nível é efetuado em um conjunto de áreas cerebrais que não se superpunha com as clássicas regiões do hemisfério esquerdo envolvidas no processamento da linguagem ou da semântica verbal.

Esses estudos foram complementados por Grotheer (2018), que mostrou que mesmo nos fascículos chaves para ambas competências, cada um contém sub-feixes especializados para leitura ou matemática. Esses sub-feixes distintos sugerem que provavelmente as conexões da matéria branca para leitura (linguagem escrita) e matemática são mais espacialmente específicas do que previamente imaginado, o que corrobora a assertiva do processamento independente dessas redes.

Ambos os estudos sugerem que a hipótese de Chomski, de que a origem da capacidade matemática repousa na abstração de operações linguísticas, não procede.

Os domínios matemáticos investigados por Almaric & Deahaene empregam uma rede bilateral das regiões pré-frontal, parietal e temporal inferior, a qual também é ativada quando tanto matemáticos, profissionais ou não, como não matemáticos reconhecem e manipulam números mentalmente.

Essa rede neural, constituída igualmente pelo OFM e pelo ANS, associada às estruturas neurais matemáticas que respondem pelas noções de espaço é de origem evolucionária, e constitui o cerne da *Ur-Mathematik,* parcialmente estruturante dos processos mentais humanos (Almeida, 2011, 2017).

Ela reúne os conceitos matemáticos básicos que contribuem fundamentalmente para a sobrevivência das espécies, particularmente a humana. Isso confirma a tese de D'Ambrosio, quando afirmou que a Matemática é uma das estratégias elaboradas pelo homem em busca da sobrevivência da sua espécie (D'Ambrosio & Almeida, 2017; Almeida, 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALMEIDA, Manoel de Campos. P**ré-história da Matemática & Educação Matemática - Seus Vínculos e Importância Pedagógica**. In: anais X EDUCERE, 2011.

ALMEIDA, Manoel de Campos. **Origens da Matemática – A Pré-História da Matemática. Vol. II – O Neolítico e o Alvorecer da História.** Curitiba: Progressiva, 2011. Prefácio por Ubiratan D'Ambrosio.

A Matemática Na Idade da Pedra. São Paulo: Editora da Livraria da Física, 2017.

A Gênese do Número – Os Neandertais Sabiam Contar? Curitiba: Manoel de Campos Almeida, 2019.

ALMEIDA, Manoel de Campos; JUSTINO, Edson José Rodrigues**. Como o Cérebro Processa a Matemática? – Ensinamentos da Neurociência para uma Pedagogia Renovada,** Curitiba, Manoel de Campos Almeida, 2020 a.

Pré-História da Geometria - Origens, Evolução e Neurociência da Geometria. Curitiba, Manoel de Campos Almeida, 2020 b

A Neurociência e a História das Frações. In: Revista Brasileira de História da Matemática, 2020 c.

A Neurociência e a Introdução da Medida na Geometria. In: Anais do XIV SNHM, 2021.

AMALRIC, Marie ; DEHAENE, Stanislas. **Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians.** In: Proceedings of the National Academy of Sciences. Abril 2016

ANOBILE, Giovanni; BURR, David C.;IAIA, Marika; MARINELLI, Chiara V.; ANGELELLI, Paola; TURI, Marco. **Independent adaptation mechanisms for numerosity and size perception provide evidence against a common sense of magnitude.** In: Nature: Scientific Reports| (2018) 8:13571

CHOMSKY, N. **Language and Mind**. Cambridge: Cambridge Univ Press, 2006.

BENSON-AMRAM, Sarah; GILFILLAN, Geoff; McCOMB, Karen**. Numerical assessment in the wild: insights from social carnivores.** In: Phil. Trans. R. Soc. B 373: 20160508.

BONGARD, Sylvia; NIEDER, Andreas. **Basic mathematical rules are encoded by primate prefrontal cortex neurons.** In: PNAS: February 2, 2010; vol. 107; nº 5; 2.277-2.282.

CANTLON, Jessica F.; BRANNON, Elizabeth M. **Shared System for Ordering Small and Large Numbers in Monkeys and Humans**. In: Psychological Science, 17(5), 401-406. 2006.

D'AMBROSIO, Ubiratan; ALMEIDA, Manoel de Campos. **Ethnomathematics and the Pré-história & EducaçãoEmergence of mathematics**. In: The Nature and Development of Mathematics; London: Routledge, 2017.

DEHAENE, S. Th**e Number Sense**. New York: Oxford Univ Press, 2011.

FELTEN, David L.; SHETTY, Anil N. **Netter - Atlas de Neurociência.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

GROTHEER, Mareike; ZHEN, Zonglei; LERMA-USABIAGA, Garikoitz; GRILL-SPECTOR, Kalanit. **Separate lanes for Math and Reading in the White matter highways of the human brain.** In: doi: http://dx.doi.org/10.1101/420216 bioRxiv preprint first posted online Sep. 17, 2018.

HADAMARD, J. (1945) **An Essay on the Psychology of Invention in the Mathematical Field**. Princeton: Princeton Univ Press, 1945.

KADOSH, Roi Cohen; WALSH, Vincent. **Numerical Representation in the Parietal Lobes: Abstract or not Abstract?** In: Behavioral and Brain Sciences. London: Cambridge Press, 2009.

KADOSH, Roi Cohen; et alii. **Notation-Dependent and – Independent Representations of Numbers in the Parietal Lobes.** In: Neuron 53, 307-314, January 18, 2007.

KADOSH, Cohen et al.. **Modulating Neuronal Activity Produces Specific and Long-Lasting Change.** In: Current Biology 20, 1–5, November 23, 2010.

NIEDER, Andreas. **Neural constraints on human number concepts**. In: December 2019 Current opinion in neurobiology 60:28-36.

NIEDER, Andreas. **The neuronal code for number.** In: Nature Reviews Neuroscience · May 2016.