

Estudo da relação entre a irrigação dos lobos cerebrais e o processo de girificação do manto cortical

Study of the relation between cerebral lobe irrigation and the process of gyrification of the cortical mantle

Estudio de la relación entre la irrigación de los lóbulos cerebrales y el proceso de girificación del manto cortical

Recebido: 04/03/2026 | Revisado: 16/03/2026 | Aceitado: 17/03/2026 | Publicado: 18/03/2026

Heloísa Costa dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5793-0928>

Universidade Federal do Paraná, Brasil

E-mail: heloisacosta@ufpr.br

Giovanna Pimentel Miranda

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4932-1417>

Universidade Federal do Paraná, Brasil

E-mail: giovannamiranda@ufpr.br

Ayrton Alves Aranha Junior

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2696-4703>

Universidade Federal do Paraná, Brasil

E-mail: ayrtonaranha@ufpr.br

Djanira Aparecida da Luz Veronez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2504-6318>

Universidade Federal do Paraná, Brasil

E-mail: veronezda@ufpr.br

Resumo

A girificação, ou dobramento cortical, constitui um processo fundamental do desenvolvimento cerebral, caracterizado pela formação de giros e sulcos que ampliam a superfície cortical e permitem o aumento da capacidade cognitiva. Paralelamente, estabelece-se a rede vascular responsável pela irrigação e drenagem do manto cortical, cuja organização acompanha a complexidade morfológica do córtex. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo analisar os padrões de formação cortical e sua correlação com a morfologia e o mecanismo de vascularização cerebral. Para tanto, realizou-se revisão sistematizada e narrativa da literatura em bases de dados (SciELO, LILACS/BIREME, PubMed/MEDLINE e Elsevier), complementada por obras clássicas de Anatomia e Neuroanatomia. Os dados obtidos por meio da análise morfológica, descritiva e funcional demonstram que o processo de girificação segue um padrão relativamente consistente em regiões como os lobos frontal, parietal, temporal, insular e occipital, refletindo especializações funcionais específicas. Para mais, a formação concomitante da rede vascular revela um arranjo estratificado, adaptado às demandas metabólicas regionais, com maior densidade em áreas de elevada atividade funcional. Evidenciou-se, ainda, a interdependência entre dobramento cortical e vascularização, assegurando equilíbrio entre crescimento neuronal e suprimento energético. Alterações nesses processos encontram-se relacionadas a condições como polimicrogiria, esquizofrenia e autismo, ao passo que sua evolução nos primatas superiores sustentou a emergência de funções cognitivas complexas. Conclui-se que a compreensão integrada da girificação e da irrigação cerebral amplia o entendimento das bases anatômicas e funcionais do córtex, com implicações relevantes para a neurociência, a clínica e a evolução humana.

Palavras-chave: Córtex cerebral; Girificação; Vascularização; Neuroanatomia; Evolução.

Abstract

Gyrification, or cortical folding, is a fundamental process of brain development, characterized by the formation of gyri and sulci that expand the cortical surface and enable increased cognitive capacity. In parallel, the vascular network responsible for the irrigation and drainage of the cortical mantle is established, whose organization follows the morphological complexity of the cortex. Thus, this study aimed to analyze the patterns of cortical formation and their correlation with the morphology and mechanism of cerebral vascularization. A systematized and narrative review of the literature was carried out in databases (SciELO, LILACS/BIREME, PubMed/MEDLINE and Elsevier), complemented by classical works of Anatomy and Neuroanatomy. The data obtained through morphological, descriptive, and functional analysis demonstrate that the gyrification process follows a relatively consistent pattern in

regions such as the frontal, parietal, temporal, insular, and occipital lobes, reflecting specific functional specializations. Furthermore, the concomitant formation of the vascular network reveals a stratified arrangement, adapted to regional metabolic demands, with greater density in areas of high functional activity. The interdependence between cortical folding and vascularization was also evidenced, ensuring balance between neuronal growth and energy supply. Alterations in these processes are related to conditions such as polymicrogyria, schizophrenia, and autism, while their evolution in higher primates supported the emergence of complex cognitive functions. It is concluded that the integrated understanding of gyrification and cerebral irrigation expands the knowledge of the anatomical and functional bases of the cortex, with relevant implications for neuroscience, clinical practice, and human evolution.

Keywords: Cerebral cortex; Gyrification; Vascularization; Neuroanatomy; Evolution.

Resumen

La girificación, o plegamiento cortical, constituye un proceso fundamental del desarrollo cerebral, caracterizado por la formación de giros y surcos que amplían la superficie cortical y permiten el aumento de la capacidad cognitiva. Paralelamente, se establece la red vascular responsable de la irrigación y drenaje del manto cortical, cuya organización acompaña la complejidad morfológica de la corteza. De este modo, el presente estudio tuvo como objetivo analizar los patrones de formación cortical y su correlación con la morfología y el mecanismo de vascularización cerebral. Para ello, se realizó una revisión sistematizada y narrativa de la literatura en bases de datos (SciELO, LILACS/BIREME, PubMed/MEDLINE y Elsevier), complementada por obras clásicas de Anatomía y Neuroanatomía. Los datos obtenidos mediante análisis morfológico, descriptivo y funcional demuestran que el proceso de girificación sigue un patrón relativamente consistente en regiones como los lóbulos frontal, parietal, temporal, insular y occipital, reflejando especializaciones funcionales específicas. Además, la formación concomitante de la red vascular revela una disposición estratificada, adaptada a las demandas metabólicas regionales, con mayor densidad en áreas de elevada actividad funcional. También se evidenció la interdependencia entre plegamiento cortical y vascularización, asegurando el equilibrio entre crecimiento neuronal y suministro energético. Alteraciones en estos procesos se relacionan con condiciones como la polimicrogiria, la esquizofrenia y el autismo, mientras que su evolución en los primates superiores sustentó la emergencia de funciones cognitivas complejas. Se concluye que la comprensión integrada de la girificación y la irrigación cerebral amplía el entendimiento de las bases anatómicas y funcionales de la corteza, con implicaciones relevantes para la neurociencia, la clínica y la evolución humana.

Palabras clave: Corteza cerebral; Girificación; Vascularización; Neuroanatomía; Evolución.

1. Introdução

O processo de girificação, também denominado dobramento cortical ou corticogênese, descreve a formação de sulcos (depressões) e giros (elevações) na superfície do manto cortical. Essa arquitetura dobrada permite que o córtex — fina camada de neurônios — apresente maior área de superfície dentro do neurocrânio, otimizando a capacidade cognitiva durante o desenvolvimento intrauterino. À medida que o cérebro cresce e se expande, sua superfície se dobra, formando os padrões característicos de sulcos e giros que distinguem o cérebro humano de outras espécies (Santos, 2002).

No desenvolvimento embrionário, o córtex cerebral origina-se do pálio, que se diferencia em três regiões: arquicórtex, paleocórtex e neocórtex. Filogeneticamente, o arquipálio associa-se ao córtex olfatório, originando o hipocampo, enquanto o paleopálio constitui uma das porções mais antigas do córtex. O neopálio, por sua vez, representa cerca de 90% da superfície cortical. Nessa região, grupos de células nervosas migram para posições profundas à pia-máter, diferenciando-se em neurônios maduros. As sucessivas ondas de migração resultam em um arranjo laminar, no qual neurônios mais antigos ocupam camadas internas e os mais recentes, camadas superficiais. Ao nascimento, o córtex apresenta-se, portanto, organizado em camadas distintas (Lagman, 2021).

A morfologia cortical, entretanto, não se consolida ao final da embriogênese. Ela resulta de um equilíbrio dinâmico, modulada pelas propriedades elastomecânicas da substância branca, que influenciam tanto o desenvolvimento quanto o envelhecimento cerebral (Lett et al., 2019).

Associado a esse processo de formação cortical, ocorre o estabelecimento de uma rede vascular responsável pela irrigação e drenagem do manto. As artérias que suprem o córtex — classicamente denominadas artérias corticais ou intracerebrais — podem ser classificadas em curtas, médias ou longas, de acordo com a profundidade e o padrão de

distribuição. Adicionalmente, quatro camadas vasculares podem ser distinguidas no córtex, apresentando diferenças quanto à espessura, densidade e orientação da malha capilar. Essas variações refletem a adaptação às necessidades metabólicas regionais, de modo que áreas com maior densidade de anastomoses arteriais e shunts arteriovenosos demonstram maior tolerância à isquemia. Todavia, a organização dessas conexões vasculares ainda não está completamente elucidada (Reina-De La Torre et al., 1998).

Diante disso, O presente estudo teve como objetivo analisar os padrões de formação cortical e sua correlação com a morfologia e o mecanismo de vascularização cerebral.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se metodologicamente como sendo uma revisão sistemática de literatura (Snyder, 2019) com abordagem quantitativa em relação à quantidade de 6 (Seis) artigos selecionados para compor o “corpus da investigação” e, qualitativa em relação às discussões realizadas sobre estes artigos (Pereira et al., 2018; Risemberg et al, 2026). Sendo desenvolvida em duas etapas:

A primeira etapa foi realizada por meio de uma revisão sistematizada e narrativa da literatura para aquisição de um levantamento de dados morfológicos e funcionais do córtex cerebral humano.

Como estratégia de busca foi desenvolvido um levantamento bibliográfico de artigos indexados nas principais bases de dados como: SciELO (Brasil Scientific Electronic Library Online), LILACS/BIREME (Literatura LatinoAmericana e do Caribe em Ciências da Saúde), PubMed/MEDLINE e Elsevier. Ademais, foram utilizados livros clássicos de Anatomia e Neuroanatomia.

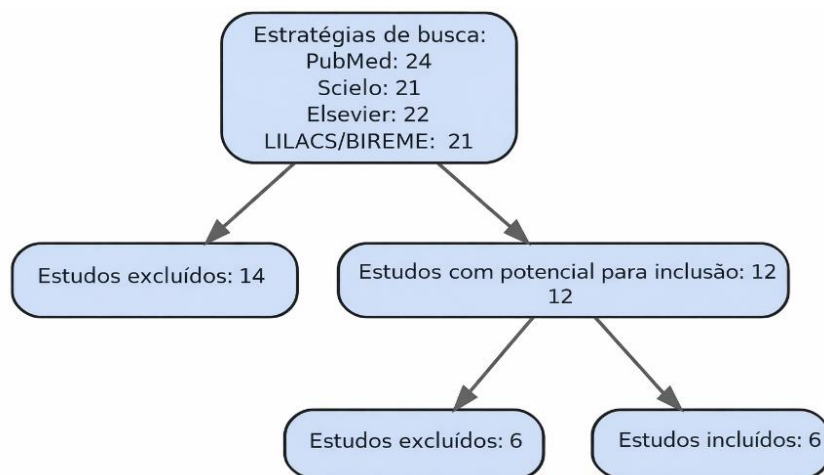
Os artigos científicos foram selecionados utilizando as palavras chaves que constam nos Descritores em Ciências da Saúde (Decs) e Medical Subject Headings (MeSH), em português, inglês, espanhol e francês como: Anatomia (anatomy, anatomía, anatomie); Cérebro (Cerebrum, Cerebro, Cerveau); Córtex cerebral (Cerebral Cortex, Corteza Cerebral, Cortex cérébral); Lobo Frontal (Frontal Lobe, Lóbulo Frontal, Lobe frontal); Lobo Insular (Insular Cortex, Corteza Insular, Insula de Reil); Lobo Límbico (Limbic Lobe, Lóbulo Límbico, Lobe limbique); Lobo Occipital (Occipital Lobe, Lóbulo Occipital, Lobe occipital); Lobo Parietal (Parietal Lobe, Lóbulo Parietal, Lobe pariétal); Lobo Temporal (Temporal Lobe, Lóbulo Temporal, Lobe temporal); Mapeamento Cerebral (Brain Mapping, Mapeo Cerebral, Cartographie cérébrale); Neuroanatomia (Neuroanatomy, Neuroanatomía, Neuroanatomie) e Substância Cinzenta (Gray Matter, Sustancia Gris, Substance grise).

De forma intencional, realizou-se o cruzamento entre no mínimo três palavras-chaves por vez, em cada uma das bases de dados consultadas.

Como critérios de inclusão foram selecionados artigos científicos publicados nas últimas cinco décadas, bem como, livros técnicos, do tipo texto e atlas, que apresentaram descrições morfológicas, variações anatômicas, índices morfométricos relacionados aos giros e sulcos do córtex cerebral.

Como critérios de exclusão foram desconsiderados artigos científicos com dados imprecisos, estudos que apresentaram comorbidades que poderiam gerar vieses nos resultados da pesquisa, editoriais e notas técnicas por não passarem por um processo rigoroso de avaliação, conforme Figura 1.

Figure 1 - Fluxograma da revisão de literatura.



Fonte: Autores (2025).

Em seguida segue a relação dos autores selecionados para compor os 6 artigos do corpus da pesquisa e, com discussão narrativa são: (1) Reina de la Torre et al., 1998; (2) Moffat & Schuurmans, 2023; (3) Jansen & Andermann, 2005; (4) Silva et al., 2023; (5) Verfaillie et al., 2018; (6) Loukas et al., 2011.

A associação dos descritores supracitados, seguida da busca nos portais Lilacs/BIREME, Pubmed, Elsevier e Scielo contabilizou 88 artigos encontrados. Após o cumprimento dos critérios de inclusão e exclusão, 6 foram selecionados para compor o presente estudo.

Na segunda etapa, foi dado seguimento às análises sobre o mecanismo de formação do processo de vascularização do córtex cerebral e sua relação com os lobos cerebrais e o processo de girificação, por meio de agrupamento e organização dos dados obtidos e elaboração dos resultados com o referencial teórico já coletado.

3. Resultados e Discussão

A análise dos trabalhos demonstra que o padrão de girificação cerebral em humanos segue uma organização relativamente consistente, sobretudo nas regiões extensas do cérebro, como os lobos frontal, parietal, temporal, occipital e lobo da ínsula. O processo de formação de giros e sulcos não apenas amplia a superfície cortical, mas também reflete a especialização funcional dessas áreas. O sulco central, por exemplo, destaca-se como marco anatômico na separação entre os lobos frontal e parietal, correlacionando-se à divisão funcional entre áreas motoras e sensoriais. Da mesma forma, o sulco lateral delimita o lobo temporal, associado ao processamento auditivo e à linguagem, enquanto o sulco calcarino no lobo occipital abriga o córtex visual primário, essencial para a visão. A girificação é especialmente acentuada no córtex pré-frontal, cuja densidade de dobras relaciona-se a funções cognitivas complexas, como planejamento, tomada de decisão e comportamento social. Essa característica é considerada distintiva da espécie humana, reforçando sua relevância evolutiva.

Além disso, apesar da relativa uniformidade do padrão geral, há variações individuais influenciadas por fatores genéticos, ambientais e do desenvolvimento embrionário. Tais diferenças podem repercutir na funcionalidade cerebral e têm sido associadas a transtornos neurológicos e psiquiátricos, como esquizofrenia e autismo, nos quais padrões atípicos de dobramento cortical indicam alterações na conectividade neural.

Outrossim, o desenvolvimento do córtex está intimamente associado à formação do sistema vascular, responsável pelo suprimento metabólico do tecido nervoso. As artérias corticais — classificadas em curtas, médias e longas — distribuem-se em diferentes profundidades e apresentam padrões de ramificação que acompanham a complexidade da girificação.

A vascularização cortical organiza-se em quatro camadas, que se distinguem pela densidade, orientação e espessura da malha capilar. Essa disposição garante a adaptação regional às demandas metabólicas, resultando em maior densidade de conexões vasculares em áreas de intensa atividade funcional. Nessas regiões, anastomoses arteriais e shunts arteriovenosos proporcionam maior tolerância à isquemia, embora a organização global desse sistema ainda não esteja totalmente esclarecida (Reina-De La Torre et al., 1998).

Os dados analisados sugerem uma relação direta entre a extensão do manto cortical e o desenvolvimento da rede vascular. A maior complexidade giral implica aumento da superfície cortical e, consequentemente, maior necessidade de irrigação e drenagem. Esse paralelismo estrutural garante o suporte funcional às regiões especializadas, equilibrando crescimento neuronal e suprimento energético.

Além disso, a evolução da girificação em espécies de mamíferos superiores, como primatas e humanos, foi acompanhada pelo aperfeiçoamento do sistema vascular, permitindo o suporte a funções cognitivas mais complexas. Essa coevolução estrutura-função reforça a ideia de que o dobramento cortical e sua irrigação são fenômenos interdependentes, sustentando a eficiência das conexões sinápticas (Moffat; Schuurmans, 2023).

Adicionalmente, a relação entre girificação e vascularização é determinante na especialização funcional do córtex e no conceito de dominância hemisférica. O hemisfério dominante exerce maior controle sobre funções como linguagem, comunicação e coordenação motora (Tzourio-Mazoyer; Seghier, 2016). Assim, variações anatômicas no córtex e em sua rede vascular podem refletir adaptações funcionais específicas, com implicações diretas no desempenho cognitivo.

Alterações na girificação e no padrão vascular estão associadas a diferentes patologias. A polimicrogiria, caracterizada por excesso de pequenos giros anormais, pode comprometer o desenvolvimento neurofuncional (Jansen; Andermann, 2005; Silva et al., 2023). Variações na espessura cortical ou na área total do manto podem afetar a quantidade de neurônios e conexões sinápticas, impactando habilidades cognitivas e comportamentais (Verfaillie et al., 2018). Padrões anômalos de dobramento também têm sido descritos em distúrbios como esquizofrenia e autismo, nos quais se observam diferenças de conectividade neural.

Em perspectiva evolutiva, a presença de um córtex dobrado em humanos e primatas, em contraste com a superfície lisa de roedores, reflete uma adaptação que favoreceu a expansão de áreas especializadas, como as identificadas por Brodmann em 1909. Essa heterogeneidade citoarquitetônica reforça a ligação entre estrutura, vascularização e função cortical (Loukas et al., 2011).

4. Considerações Finais

A presente análise evidenciou que a girificação constitui um processo fundamental para a expansão e especialização do córtex cerebral humano, permitindo o aumento da área de superfície e o desenvolvimento de funções cognitivas superiores. O estudo demonstrou que os principais sulcos e giros não apenas delimitam regiões anatômicas, mas também estão diretamente associados à funcionalidade específica de cada lobo cerebral.

Simultaneamente, verificou-se que a irrigação cortical apresenta um arranjo complexo e estratificado, capaz de acompanhar a demanda metabólica das diferentes regiões. A correlação entre dobramento cortical e vascularização confirma a interdependência entre morfologia e fisiologia, garantindo a sustentação energética necessária para a atividade neuronal.

A revisão dos dados também reforça que alterações nesses processos, seja na organização dos giros ou na malha vascular, estão relacionadas a condições patológicas relevantes, como polimicrogiria, esquizofrenia e transtornos do espectro autista. Em contrapartida, a evolução conjunta da girificação e da irrigação nos primatas superiores representa um marco

adaptativo que possibilitou a emergência de habilidades cognitivas complexas, distinguindo o cérebro humano de outras espécies.

Como limitação, destaca-se que a literatura disponível ainda carece de consenso sobre a organização global da rede vascular cortical, especialmente quanto ao papel das anastomoses e shunts arteriovenosos em condições de sobrecarga funcional ou hipóxia. Dessa forma, futuras investigações com métodos de neuroimagem avançada e análises histológicas mais detalhadas podem elucidar de forma mais precisa a interação entre arquitetura cortical e perfusão sanguínea.

Por fim, a compreensão integrada da girificação e da irrigação cerebral não apenas amplia o conhecimento anatômico e funcional do córtex, mas também contribui para o entendimento das bases estruturais de diferentes doenças neurológicas e psiquiátricas, reforçando sua importância para a neurociência, a clínica e a evolução humana.

Referências

- Budday, S., Nay, R., de Rooij, R., Steinmann, P., Wyrobek, T., Ovaert, T. C., & Kuhl, E. (2015). Mechanical properties of gray and white matter brain tissue by indentation. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 46, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.02.024>
- Bystron, I., Blakemore, C., & Rakic, P. (2008). Development of the human cerebral cortex: Boulder Committee revisited. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(2), 110–122. <https://doi.org/10.1038/nrn2252>
- Jansen, A., & Andermann, E. (2005). Genetics of the polymicrogyria syndromes. *Journal of Medical Genetics*, 42(5), 369–378. <https://doi.org/10.1136/jmg.2004.023952>
- Lett, T. A., Vogel, J. W., Ripke, S., Wackerhagen, C., Erk, S., Grabe, H. J., ... & Tost, H. (2019). Cortical surfaces mediate the relationship between polygenic scores for intelligence and general intelligence. *Cerebral Cortex*. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz270>
- Loukas, M., Pennell, C., Groat, C., Tubbs, R. S., & Cohen-Gadol, A. A. (2011). Korbinian Brodmann (1868–1918) and his contributions to mapping the cerebral cortex. *Neurosurgery*, 68(1), 6–11. <https://doi.org/10.1227/NEU.0b013e3181fc5cac>
- Marín-Padilla, M. (2011). The human brain intracerebral microvascular system: Development and structure. *Frontiers in Neuroanatomy*, 5, 38. <https://doi.org/10.3389/fnana.2011.00038>
- Meneses, M. S., Saitovitch, A., da Costa, J. C., & Rocha, A. J. (2004). Functional magnetic resonance imaging in the determination of dominant language cerebral area. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, 62(1), 61–67. <https://doi.org/10.1590/S0004-282X2004000100011>
- Meneses, M. S. (2016). *Neuroanatomia aplicada* (3ª ed.). Guanabara Koogan.
- Moffat, A., & Schuurmans, C. (2023). The control of cortical folding: Multiple mechanisms, multiple models. *The Neuroscientist*. <https://doi.org/10.1177/10738584231190839>
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free ebook]. Santa Maria. Editora da UFSM.
- Rash, B. G., Tomasi, S., Lim, H. D., Suh, C. Y., & Vaccarino, F. M. (2023). Intracortical neuropil growth drives folding of the primate cerebral cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(6). <https://doi.org/10.1073/pnas.2210967120>
- Reina-De La Torre, F., Rodriguez-Baeza, A., & Sahuquillo-Barris, J. (1998). Morphological characteristics and distribution pattern of the arterial vessels in human cerebral cortex: A scanning electron microscope study. *The Anatomical Record*, 251(1), 87–96. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0185\(199805\)251:1<87::AID-AR11>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(199805)251:1<87::AID-AR11>3.0.CO;2-2)
- Risemberg, R. I. C., Wakin, M. & Shitsuka, R. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *Revista E-Acadêmica*. 7(1), e0171675. <https://doi.org/10.52076/eacad-v7i1.675>. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>.
- Sadler, T. W. (2021). *Langman: Embriologia médica* (14ª ed.). Guanabara Koogan.
- Santos, R. O. (2002). *Estrutura e funções do córtex cerebral*. Centro Universitário de Brasília. <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/123456789/2421>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, Elsevier*. 104(C), 333–9. Doi: 10.1016/j.jbusres.2019.07.039.
- Silva, E. C. T., Silva, C. G., Leide, R. M. S., & Spindola, D. (2023). Polimicrogyria: Como o diagnóstico precoce influencia no desenvolvimento da doença. *Ciências Biológicas e da Saúde*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8015603>
- Toda, T., Shinmyo, Y., Dinh Duong, T. A., Masuda, K., Morizet, D., Tomita, Y., ... & Kawasaki, H. (2016). FGF signaling regulates the generation of gyrification in the developing neocortex. *Nature Neuroscience*, 19, 1746–1757. <https://doi.org/10.1038/nn.4406>
- Tzourio-Mazoyer, N., & Seghier, M. L. (2016). The neural bases of hemispheric specialization. *Neuropsychologia*, 93(Part B), 319–324. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.10.010>

Verfaillie, S. C. J., Adriaanse, S. M., Binnewijzend, M. A. A., Benedictus, M. R., Ossenkoppele, R., Wattjes, M. P., ... & van der Flier, W. M. (2018). Thinner cortex in patients with subjective cognitive decline is associated with steeper decline of memory. *Neurobiology of Aging*, 61, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2017.09.009>

Wang, Y., Necus, J., Kaiser, M., & Mota, B. (2019). On the origin of folds and fissures in the human brain. *arXiv Preprint*. <https://arxiv.org/abs/1905.02563>