



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Aplicação do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{15}\text{N}$ em Estudos Sobre Dinâmica da Matéria Orgânica em Solos Superficiais do Brasil: uma Síntese e Perspectivas

Fábio Luís de Souza Santos, Universidade de Brasília-DF. fabio.luis92@gmail.com

Glauber Neves, Universidade de Brasília-DF. glauber.unb@gmail.com

João Paulo Sena-Souza, Professor, Universidade Estadual de Montes Claros-MG. jpsenasouza@gmail.com

Vinicius Vasconcelos, Professor, Universidade de Brasília-DF. vinicius.vasconcelos@unb.br

Gabriela Bielefeld Nardoto, Professora, Universidade de Brasília-DF. gbnardoto@unb.br

Artigo recebido em 19/04/2024 e aceito em 29/01/2025

RESUMO

A razão isotópica de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) no solo fornece informações sobre o histórico da cobertura vegetal e a razão isotópica de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) no solo fornece informações sobre a dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas. O objetivo deste estudo foi identificar os fatores ambientais que mais influenciam as variações no $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de solos superficiais no Brasil e identificar as tendências existentes com base nos dados da literatura. Foram compilados valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ até 20cm de profundidade nos diferentes biomas no Brasil. Foi realizada uma análise de distribuição dos termos mais citados para avaliar o contexto do uso de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil. Foi gerado um modelo de regressão linear entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ e as variáveis temperatura, precipitação, pH do solo, razão C/N e concentração de carbono. Estudos com $\delta^{13}\text{C}$ estão mais relacionados às mudanças de uso da terra, estoque de carbono e paleoecologia. Estudos com $\delta^{15}\text{N}$ servem para determinar cadeias tróficas, atributos funcionais e funcionamento dos ecossistemas. O $\delta^{13}\text{C}$ do solo apresentou relação negativa e o $\delta^{15}\text{N}$ relação positiva com a temperatura. Os modelos lineares de $\delta^{13}\text{C}$ ($R^2 = 0,53$) e $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0,48$) foram significativos. A razão C/N do solo tem relação positiva com o $\delta^{13}\text{C}$ e negativa com o $\delta^{15}\text{N}$. Concentração de carbono e precipitação influenciaram negativamente os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, respectivamente. Além do clima, outros fatores ambientais contribuem para os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil, principalmente a razão C/N.

Palavras-chave: Isótopos estáveis; temperatura; precipitação; razão C/N.

Application of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Studies on Organic Matter Dynamics in Superficial Soils in Brazil: a Synthesis and Perspectives

ABSTRACT

The carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) in the soil provides information about the history of vegetation cover and the nitrogen isotope ratio ($\delta^{15}\text{N}$) in the soil provides information about the dynamics of organic matter in ecosystems. The objective of this study was to identify the environmental factors that most influence variations in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of surface soils in Brazil and identify existing trends based on literature data. Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were compiled up to 20cm deep in different biomes in Brazil. A distribution analysis of the most cited terms was carried out to evaluate the context of the use of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ soil in Brazil. A linear regression model was generated between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the variables temperature, precipitation, soil pH, C/N ratio and carbon concentration. Studies with $\delta^{13}\text{C}$ are more related to changes in land use, carbon stock and paleoecology. Studies with $\delta^{15}\text{N}$ serve to determine trophic chains, functional attributes and ecosystem functioning. Soil $\delta^{13}\text{C}$ showed a negative relationship and $\delta^{15}\text{N}$ a positive relationship with temperature. The linear models of $\delta^{13}\text{C}$ ($R^2 = 0.53$) and $\delta^{15}\text{N}$ ($R^2 = 0.48$) were significant. The soil C/N ratio has a positive relationship with $\delta^{13}\text{C}$ and a negative relationship with $\delta^{15}\text{N}$. Carbon concentration and precipitation negatively influenced the values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$, respectively. In addition to climate, other environmental factors contribute to soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values in Brazil, mainly the C/N ratio.

Keywords: Stable isotopes, temperature, precipitation, C/N ratio.

Introdução

O solo suporta a maior parte das espécies animais e vegetais existentes no planeta (Chapin et al., 2011). Os solos são fundamentais para a dinâmica dos ecossistemas, já que se relacionam à litosfera, biosfera, hidrosfera e atmosfera, sendo a matéria orgânica do solo o elo central dessas relações (Lal, 2013a). A formação do solo e a dinâmica da matéria orgânica são condicionadas principalmente pelo clima, em conjunto com fatores como geologia, relevo e biota potencial (Jenny, 1941). Temperatura e precipitação, portanto, são fundamentais tanto para a formação do solo quanto para a dinâmica da matéria orgânica nos ecossistemas (Lal, 2013a). Mais recentemente, as mudanças no uso da terra foram adicionadas aos fatores que condicionam a dinâmica da matéria orgânica no solo, principalmente com a substituição da vegetação nativa por pastagens ou áreas de cultivo em áreas de Cerrado em (Cordeiro et al., 2020; Oliveira et al., 2021), Caatinga (Freitas et al., 2024) e Mata Atlântica (Lima et al. 2020).

Durante os processos que envolvem a dinâmica da matéria orgânica no solo ocorrem importantes transformações biogeoquímicas que afetam os ciclos globais de carbono (C) e do nitrogênio (N). O solo é o compartimento da paisagem com maior quantidade de C, com valor estimado entre 1.500-2.400 Gt (Friedlingstein et al., 2022). A efeito de comparação, a atmosfera possui cerca de 800 Pg e a biota cerca de 560 Pg de carbono (Lal, 2013b). O C interage com certas combinações mineralógicas nos trópicos úmidos minimizam as perdas de MOS das regiões tropicais mesmo durante a conversão da terra, promovendo a estabilização do carbono orgânico (Kirsten et al., 2021). Adhikari and Hartemink (2016), mostraram, em uma revisão global, a relação direta entre as propriedades físico-químicas e biológicas do solo com serviços ecossistêmicos fundamentais. É também no solo que ocorre grande parte das transformações do N, sendo um compartimento fundamental para a ciclagem desse elemento (Robinson, 2001), principalmente no contexto das mudanças ambientais globais (Steffen et al., 2015).

Nesse contexto, tem aumentado os estudos que utilizam razões isotópicas de C ($\delta^{13}\text{C}$) e N ($\delta^{15}\text{N}$) da matéria orgânica do solo para compreensão da dinâmica dos ecossistemas (Bruggemann et al., 2011). As razões isotópicas de C e N do solo são ferramentas capazes de fornecer informações do funcionamento de ecossistemas (Ehleringer et al., 2002), por ter caráter integrador, que resume o funcionamento desses elementos no sistema solo-planta-serapilheira (Amundson et al., 2003; Craine et al., 2015a; Powell et al., 2012;

Robinson, 2001). Ramon et al. (2024) concluem que isótopos estáveis de C e N são indicadores eficientes de padrões distintos de ciclo biogeoquímico em fragmentos de vegetação urbana, mostrando que o uso do solo adjacente ao fragmento florestal altera o comportamento de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ em diferentes camadas de solo.

O $\delta^{13}\text{C}$ do solo reflete o $\delta^{13}\text{C}$ da cobertura vegetal predominante (Oliveira et al., 2021). Esse valor representa a assinatura isotópica específica do tipo de caminho metabólico para a absorção do CO_2 em cada planta no processo de fotossíntese (C_3 , CAM ou C_4). Em estudo na área de Mata Atlântica no Brasil, Lima et al. (2020) encontraram uma relação uma variação significativa entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em fragmento florestal (-28,1‰) e áreas com cobertura de cana de açúcar (-21,3‰) ou pastagem (-19,5‰). No entanto, fatores naturais também podem ser relevantes para os padrões de $\delta^{13}\text{C}$ no solo, principalmente quando consideradas apenas áreas nativas.

A temperatura e a disponibilidade de água são atributos que influenciam a preferência evolutiva das plantas à assimilação do carbono via C_3 ou C_4 (Ometto et al. 2006). Maior disponibilidade de água significa que os estômatos podem ficar abertos por mais tempo, o que diminui os valores de $\delta^{13}\text{C}$. Com maior incidência de luz por sua vez, os estômatos tendem ficar mais fechados e aumentar os valores de $\delta^{13}\text{C}$ na vegetação e, conseqüentemente, no solo. Luo et al. (2009) realizaram um estudo que compilou dados de precipitação e temperatura em 107 áreas dos principais biomas do planeta. Nesse estudo, o $\delta^{13}\text{C}$ foliar apresentou uma relação negativa com precipitação e temperatura. Quando Luo et al. (2009) consideraram apenas a relação entre $\delta^{13}\text{C}$ foliar e precipitação, encontraram uma relação ainda mais forte.

Ehleringer et al. (2000) observaram que o $\delta^{13}\text{C}$ da matéria orgânica do solo em florestas cresce com o aumento da latitude, ao passo que (os valores de $\delta^{13}\text{C}$ em áreas cobertas por gramíneas diminuem. Em revisão global, Rao et al. (2017) encontraram uma relação entre $\delta^{13}\text{C}$ e temperatura. Entretanto, essa relação é negativa onde o solo possui valores menores que -24‰ e positiva onde os valores são maiores que -24‰. Deste modo, o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas e, conseqüentemente, do solo é influenciado pelo clima (Peterson e Fry 1987).

No Brasil, Parron et al. (2004) encontraram $\delta^{13}\text{C}$ maior em uma Mata de Galeria seca em comparação com uma mata úmida de áreas florestais de Cerrado, tanto nas folhas quanto no solo. Numa escala local, os valores encontrados no solo em uma área de cerrado sentido restrito fica

em torno de -20‰, menor que os valores encontrados em área coberta por gramíneas exóticas, que é de -19‰ (Sena-Souza et al. 2023) e maior que as encontradas por Parron et al. (2004) em áreas de mata do Cerrado. O $\delta^{13}\text{C}$ de folhas em três diferentes áreas na Amazônia com precipitação média anual similar variou em função da sazonalidade (Ometto et al., 2006). Os resultados encontrados por Powell et al. (2012) indicam que regiões mais secas possuem valores isotópicos mais relacionados ao ciclo C_4 enquanto áreas mais úmidas tendem a ser mais próximas ao ciclo C_3 . Neves et al. (2022) desenvolveram um modelo de isoscape utilizando $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Cerrado, no qual identificaram uma redução dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ do solo no sentido norte-sul do bioma, pautado pela interação das variáveis climáticas com variáveis ambientais, principalmente de altimetria, indicando que o relevo exerce grande influência no padrão de distribuição do $\delta^{13}\text{C}$ no Cerrado.

O $\delta^{15}\text{N}$ integra as transformações do N no solo (Robinson, 2001; Craine et al., 2015). Os solos com maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ podem indicar maiores taxas de mineralização ou decomposição, já que cada transformação possui um índice de fracionamento, que aumenta o valor de $\delta^{15}\text{N}$ (Hogberg, 1997; Robinson, 2001). Em geral, esse enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$ ocorre em ecossistemas com menores limitações por N, pois neles existe maior disponibilidade de nitrogênio inorgânico e consequentemente, maiores taxas de transformação (Martinelli et al., 1999; Houlton et al., 2007; Nardoto et al., 2008). A fonte dominante de N para o crescimento da vegetação, por exemplo, muda com os padrões de precipitação em florestas tropicais. O nitrato predomina como fonte nos locais mais secos e o amônio nos locais mais úmidos (Houlton et al., 2007), entretanto essa razão pode ser diferente em determinados ambientes.

Templer et al. (2012) realizaram uma meta-análise para quantificar quanto os ecossistemas naturais conseguem reter o ^{15}N enriquecido depositado e mostraram que a aplicação de nitrogênio reduz a capacidade de retenção do sistema solo-planta e aumenta suas perdas para a atmosfera. Por conta dessas relações com a vegetação e com outros fatores, o clima proporciona condições diferentes de mineralização e decomposição em cada ambiente (Aranibar et al., 2008). Essas diferenças também são mostradas em escala global por Amundson et al. (2003) e Craine et al. (2015a), que encontraram relação negativa do $\delta^{15}\text{N}$ do solo com a precipitação e relação positiva com a temperatura baseadas em modelos matemáticos gerados com dados da literatura. Dessa forma, entende-se que o $\delta^{15}\text{N}$ do solo varia

de acordo com diversos fatores, tendo o clima como principal fator em escala global.

Muitas vezes os padrões de variabilidade espacial do $\delta^{15}\text{N}$ do solo encontrados em escala global são confirmados em estudos locais e regionais. Em solos da Caatinga, os resultados de Freitas et al. (2015) sugerem que as mesmas espécies de plantas, leguminosas ou não-leguminosas, apresentam valores distintos de $\delta^{15}\text{N}$ em dependendo da média de precipitação no semiárido brasileiro e encontram uma relação negativa entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a precipitação média anual. Esse padrão também foi encontrado em estudo recente conduzido por Brunello et al. (2024), onde o clima se mostrou a principal variável para os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo na Caatinga. Santos et al. (2021) encontrou padrão similar no estado de Pernambuco, onde o regime de chuvas concentrado em um curto período de tempo, aliado às condições de pH e razão C/N aumentam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ nos solos das áreas mais secas.

Na Amazônia brasileira, o gradiente de precipitação influencia o valor do $\delta^{15}\text{N}$ foliar e o valor de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Nardoto et al., 2008, 2014). Entretanto, os estudos realizados em escala global podem mascarar padrões espaciais regionais, que expressam relações não lineares entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e variáveis ambientais (Sena-Souza et al., 2020). É importante ressaltar que as mudanças no uso da terra também influenciam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo, ligado principalmente a mudança na concentração de nitrogênio no solo (Lima et al., 2020, Sena-Souza et al., 2023, Ramon et al., 2024). No Pantanal, por exemplo, a dinâmica de N é fortemente influenciada pela vegetação e manejo do solo, sendo que a concentração mais alta é encontrada na camada superficial (0–10 cm) devido à maior deposição de matéria orgânica com baixo grau de decomposição. À medida que a profundidade do solo aumenta, a C/N proporcional também aumenta, indicando uma menor disponibilidade de nitrogênio assimilável (Freitas et al., 2024).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi identificar os fatores ambientais que mais influenciam as variações no $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de solos superficiais no Brasil e identificar as tendências existentes com base nos dados da literatura. As hipóteses deste estudo são: i) o $\delta^{13}\text{C}$ do solo responde à cobertura vegetal, sendo que os biomas com predomínio florestal (Amazônia e Mata Atlântica) apresentam menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo que os outros biomas no Brasil, cuja vegetação é mais heterogênea; ii) o $\delta^{15}\text{N}$ do solo se relaciona de forma positiva com a temperatura e negativa

com a precipitação, baseado nos resultados obtidos para a América do Sul (Sena-Souza et al., 2020).

Material e métodos

Pesquisa bibliográfica

No presente trabalho foi realizada uma revisão sistemática. Foram usadas duas bases de dados on-line, Scopus e ISI Web of Science, sendo que a pesquisa de banco de dados on-line foi complementada com pesquisas no Banco de Teses e Dissertações, além da utilização das referências citadas em artigos-chave entre 1990 e 2024. Alguns autores foram contatados eletronicamente para fornecimento de dados complementares, quando suas publicações apresentaram somente parte dos resultados ou dados derivados dos valores de nosso interesse. Publicações previamente conhecidas pelo grupo de pesquisa também foram incluídas. As buscas foram realizadas em inglês e português. Para contemplar a maior gama possível de trabalhos publicados no Brasil, a busca foi realizada usando os termos para tanto para o Brasil quanto para cada bioma existente no país de forma individual. Foram considerados os biomas Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampa e Pantanal.

Para obtenção dos dados de $\delta^{13}\text{C}$ do solo foram usados os termos: “Soil carbon” OR “Soil C” OR “carbon in soil” OR “ ^{13}C ” AND “isotopic” OR “isotope” OR “stable isotopes” AND “Brazilian” OR “Brazil” OR “Brasil” OR “Brazilian Amazonia” OR “Amazonia” OR “Brazilian Amazon” OR “Brazilian northeast” OR “Caatinga” OR “Brazilian semiarid” OR “Brazilian savanna” OR “Cerrado” OR “Brazilian Cerrado” OR “Brazilian atlantic forest” OR “Atlantic Forest” OR “Mata Atlântica” OR “Brazilian Pampa” OR “Pampa” OR “Brazilian swamp” OR “Brazilian Pantanal” OR “Pantanal” OR “Charco” OR “Pantanal Brasileiro”. A mesma metodologia foi empregada para os trabalhos com dados de $\delta^{15}\text{N}$ no solo, com uso dos termos: “Soil nitrogen” OR “Soil N” OR “nitrogen in soil” OR “ ^{15}N ” AND “isotopic” OR “isotope” OR “stable isotopes” AND “Brazilian” OR “Brazil” OR “Brasil” OR “Brazilian Amazonia” OR “Amazonia” OR “Brazilian Amazon” OR “Brazilian northeast” OR “Caatinga” OR “Brazilian semiarid” OR “Brazilian savanna” OR “Cerrado” OR “Brazilian Cerrado” OR “Brazilian atlantic forest” OR “Atlantic Forest” OR “Mata Atlântica” OR “Brazilian Pampa” OR “Pampa” OR “Brazilian swamp” OR “Brazilian Pantanal” OR “Pantanal” OR “Charco” OR “Pantanal Brasileiro”. A busca pelos termos foi

feita nos resumos, palavras-chave e títulos dos estudos.

Seleção dos trabalhos e processamento de dados

Foram utilizados os seguintes critérios de inclusão para a triagem de resumo e título: estar presente os termos $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ ou similares como isótopos de C ou N no solo. Foram usados os seguintes critérios de triagem para o texto completo: a) O estudo deveria conter as coordenadas geográficas dos pontos de coleta ou mapa do qual possam ser extraídas; b) Conter resultados dentro do limite geográfico do Brasil; c) Apresentar resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo ao menos entre 0 e 20 cm de profundidade; d) Apresentar resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ em áreas naturais. Publicações que possuíam pontos dentro e fora do limite geográfico do Brasil foram mantidos, mas apenas os resultados dentro do território brasileiro foram usados. Não foram descartadas publicações que não possuem informações de temperatura e precipitação, pois esses dados podem ser obtidos em bases de dados específicas usando as coordenadas geográficas dos pontos de coleta.

Cada estudo incluído recebeu um identificador único (ID) para facilitar o rastreamento. Além dos resultados de $\delta^{13}\text{C}$ ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo, foram extraídas as seguintes informações relatadas no texto completo e materiais complementares: primeiro autor do estudo, ano de publicação, coordenadas geográficas, bioma e fitofisionomia onde o estudo foi realizado. Também foram reunidos dados de percentual de C e N, razão C/N e pH do solo, sempre que os trabalhos traziam essas informações. O software de extração de dados WebPlot Digitizer também foi usado para obter dados úteis de dados exibidos em figuras publicadas (Rohatgi 2018).

Os valores isotópicos de áreas naturais e antrópicas (agricultura, pastagem e florestas secundárias) dentro de cada bioma foram comparados com teste t ou teste de Wilcoxon, de acordo com a distribuição dos dados. Todos os biomas, exceto Amazônia, apresentaram diferenças significativas entre áreas naturais e antrópicas ($p < 0,05$). Por isso, mantivemos apenas áreas sob vegetação natural no estudo. Foram comparadas as médias e desvio padrão dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ do solo de cada bioma através de análise de variância (ANOVA) à significância de 5%. Também foram gerados boxplots para apresentação dos valores de mediana dessas variáveis em cada bioma. As análises foram realizadas no programa R (R core team, 2019). Todos os dados utilizados e suas respectivas

referências estão disponibilizados em uma tabela como material suplementar.

Variáveis climáticas

As variáveis climáticas utilizadas neste estudo foram temperatura média anual (MAT) e precipitação média anual (MAP). Esses dados foram extraídos da plataforma WorldClim, versão 2.0 (www.worldclim.org), com uma resolução espacial de 30 segundos, onde cada pixel corresponde a uma área de aproximadamente 1 km². Esses dados foram capturados por satélites em todo o mundo, durante uma série histórica de 30 anos, entre 1970 e 2000. Os dados foram compilados em médias mensais nesse período.

Foram testadas relações entre MAT e MAP com $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo por meio de regressões lineares. Essas regressões foram realizadas em duas escalas: escala do Brasil - utilizando todo o conjunto de dados; e escala do bioma: utilizando os dados dentro do limite geográfico de cada bioma. As análises foram realizadas no programa R (R core team, 2019).

Foi gerado um modelo de regressão linear adicional com todo conjunto de dados, considerando $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ do solo como variáveis respostas e adicionando percentual de C e N, razão C/N e pH do solo, além de MAP e MAT como variáveis preditoras. Dentre as variáveis preditoras, os percentuais de C e N apresentaram correlação entre si, por isso apenas o percentual de C foi usado nos modelos. Esses modelos consideram a interação entre as variáveis preditoras. A seleção de modelos foi realizada através do critério de Akaike no programa R (R core team, 2019). Baseado na distribuição dos dados e nas relações encontradas por Sena-Souza et al. (2020), foram realizadas regressões polinomiais entre o $\delta^{15}\text{N}$ do solo e o logaritmo da precipitação média anual no Brasil (logMAP) e com os valores de MAP localizados no bioma Amazônia, também utilizando o programa R.

Os dados $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo utilizados estão disponibilizados em Environmental Isotope Studies, EIS (2024), “ $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in Brazilian soils: a literature revision”, Mendeley Data, V2, doi: 10.17632/9ctvtjmwmm.2.

Análises de contexto e tendências

Com os títulos e resumos de toda a busca realizada nas plataformas de pesquisa salvos em um documento de texto, foi gerada a estatística

descritiva dos dados, utilizando o programa VosViewer. Essa estatística foi gerada através dos termos contidos nos títulos e nos resumos (abstracts) de todos estudos selecionados pelas bases no momento da busca, mesmo os que não atendiam aos critérios de seleção citados acima. Foram excluídos os rótulos de resumos estruturados e os direitos autorais. Foi utilizado o método de contagem total e foram excluídos os termos que se repetiam menos de 15 vezes em todo documento de texto. Também foram excluídas manualmente as preposições, artigos e unidades de medida.

A partir disso, o programa seleciona os termos mais relevantes e os separa em grupos com os termos mais associados entre si. Isso possibilita visualizar os assuntos mais retratados nas publicações e as relações entre eles. Foram separados ainda os termos por data de publicação, considerando os trabalhos publicados entre 2006 e 2023, para verificar a tendência nos assuntos retratados nas publicações em escala temporal. Os resultados são apresentados em inglês, devido à padronização dos resumos, que são escritos em inglês na maior parte dos trabalhos.

Resultados

Distribuição dos dados

Foram usados 78 trabalhos entre artigos científicos (74), teses de doutorado (1) e dissertações de mestrado (3). Destes, 64 contribuíram com dados de $\delta^{13}\text{C}$ e 42 com dados de $\delta^{15}\text{N}$ no solo até 20 cm e profundidade ao longo de todos os biomas brasileiros (Figura 1). As informações de cada trabalho utilizado se encontram no material suplementar do presente estudo.

O bioma Pampa possui os maiores valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ no solo (Tabela 1). O Pampa possui maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo que os do Cerrado ($p < 0,05$), que por sua vez apresenta maiores valores que Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal ($p < 0,05$), enquanto a Amazônia apresenta os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo. Amazônia e Caatinga possuem os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo e não diferem entre si. O Pampa, por sua vez, possui valores menores que da Caatinga e maiores que de Cerrado e Pantanal ($p < 0,05$), e similar à Mata Atlântica. Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo do Cerrado não diferem estatisticamente dos valores na Mata Atlântica e no Pantanal (Figura S1).

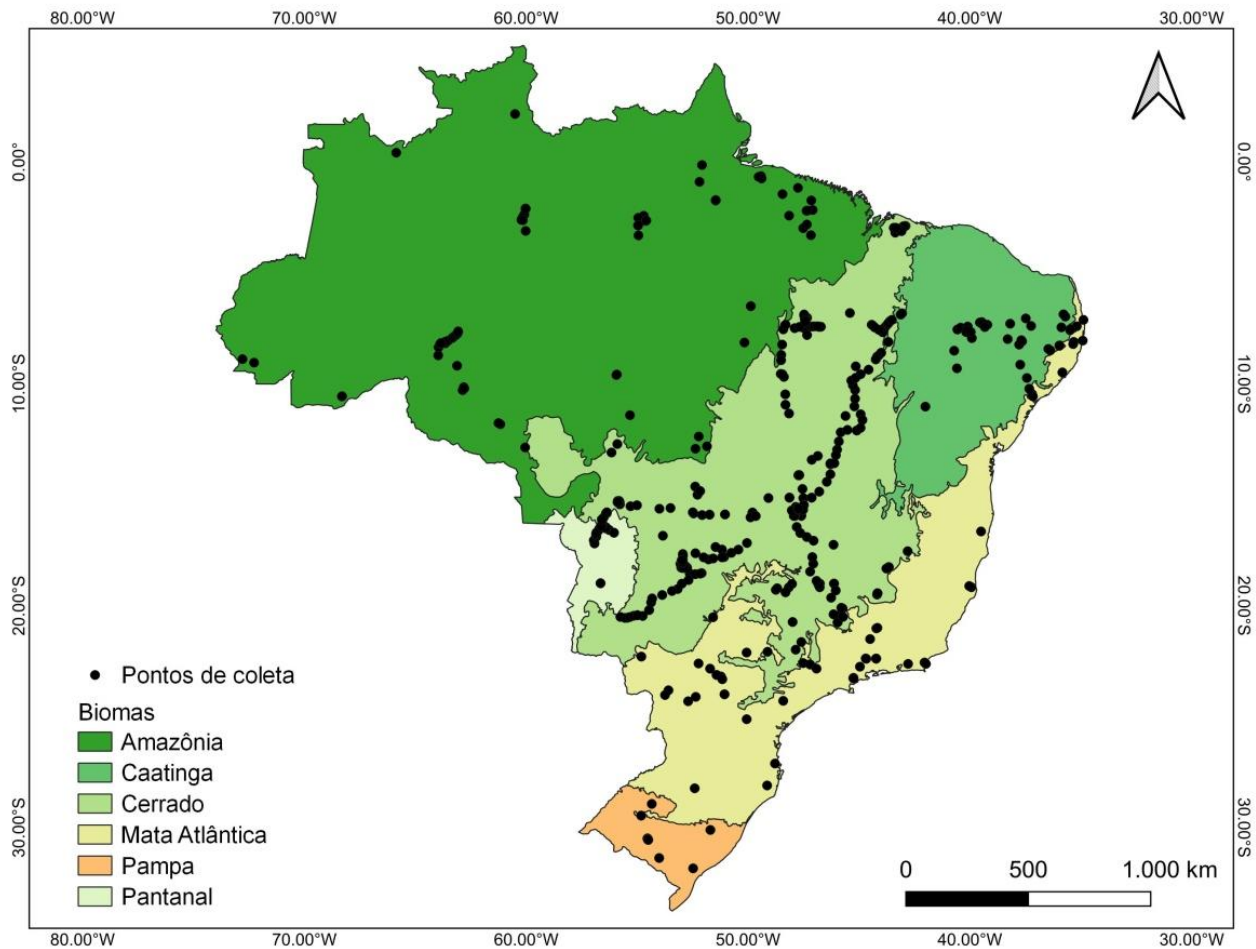


Figura 1: Pontos de coleta publicados na literatura com dados de $\delta^{13}\text{C}$ e/ou $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil.

Tabela 1: Valores médios $\pm$ (desvio padrão), mediana e número amostral de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de solos até 20 cm de profundidade, em diferentes biomas no Brasil.

Bioma	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)			$\delta^{15}\text{N}$ (‰)		
	Média (dp)	Mediana	n amostral	Média (dp)	Mediana	n amostral
Amazônia	-26,5 (4,0)	-24,8	53	8,3 (2,9)	8,9	50
Caatinga	-25,4 (0,9)	-25,3	23	9,3 (4,3)	8,6	32
Cerrado	-22,6 (3,8)	-24,4	398	5,6 (2,7)	6,1	91
Mata Atlântica	-24,4 (3,4)	-25,4	57	6,1 (1,9)	5,9	49
Pampa	-18,2 (4,2)	-15,4	12	6,9 (0,9)	6,6	5
Pantanal	-24,8 (3,2)	-26,2	38	5,3 (2,0)	5,1	32

Clima e isótopos estáveis de C e N no Brasil

Considerando todos os pontos amostrados no Brasil, houve relação significativa ($p < 0,05$) entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAT, com $R^2 = 0,09$ (Figura 2a), e não houve relação significativa

entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAP (Figura 2b). O $\delta^{15}\text{N}$ do solo também apresentou relação significativa ($p < 0,05$) com MAT ($R^2 = 0,03$) (Figura 2c), e não com MAP (Figura 2d).

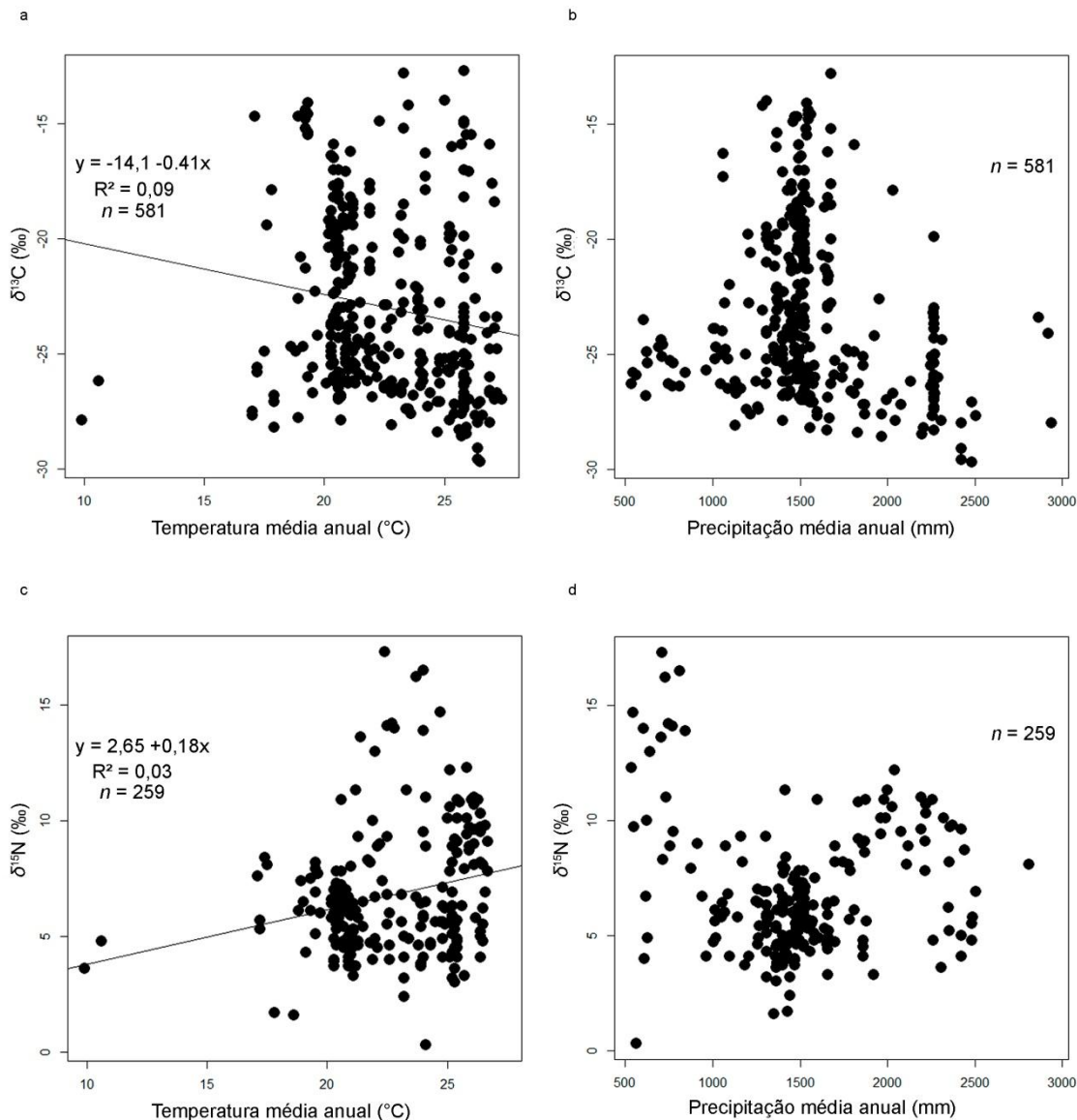


Figura 2: Relação entre $\delta^{13}\text{C}$ no solo, até 20cm de profundidade, com a) temperatura média anual; e b) precipitação média anual; e relação entre $\delta^{15}\text{N}$ no solo, até 20cm de profundidade, e c) temperatura média anual; e d) precipitação média anual no Brasil. Linhas de tendências indicam que houve relação significativa entre as variáveis ($p < 0,05$). Dados de temperatura e precipitação foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

Foi encontrada uma relação significativa ($p < 0,05$) entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAT na Caatinga ($R^2 = 0,15$, $y = -19,17 - 0,27x$). Para os outros biomas não foram encontradas relações significativas entre essas variáveis (Figura S2). Não houve relação significativa entre o $\delta^{13}\text{C}$ do solo e MAP quando os pontos foram divididos pelos biomas onde estão inseridos (Figura S3).

O $\delta^{15}\text{N}$ do solo apresentou relação significativa ($p < 0,05$) com a MAT no Cerrado ($R^2 = 0,07$, $y = 10,98 - 0,25x$) e no Pantanal ($R^2 = 0,21$, $y = 131,89 - 5,00x$) (Figura S4). Nos outros biomas não foi encontrada relação significativa entre essas variáveis (Figura S4). O $\delta^{15}\text{N}$ do solo apresentou

relação significativa ($p < 0,05$) com a precipitação na Caatinga ($R^2 = 0,11$, $y = 15,99 + 0,01x$) (Figura S5), na Mata Atlântica ($R^2 = 0,10$, $y = 9,77 - 0,00x$) e no Pantanal ($R^2 = 0,28$, $y = -52,60 + 0,05x$). Para os outros biomas não foram encontradas relações significativas entre essas variáveis (Figura S5).

Modelos lineares e polinomiais

O modelo de $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Brasil foi significativo ($p < 0,05$, $F = 8,11$ on 5 and 27 DF, R^2 ajustado = 0,53). Razão C/N do solo (Figura 3b) e carbono no solo (Figura 3c) apresentaram relação significativa ($p < 0,05$) com o $\delta^{13}\text{C}$ do solo individualmente. Os resíduos do modelo

apresentaram distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk: 0,95, $p = 0,15$). Segundo o teste de Cook não há *outliers* na amostragem. Os dados

possuem auto-correlação espacial (índice de Moran: 0,26, $p = 0,00$).

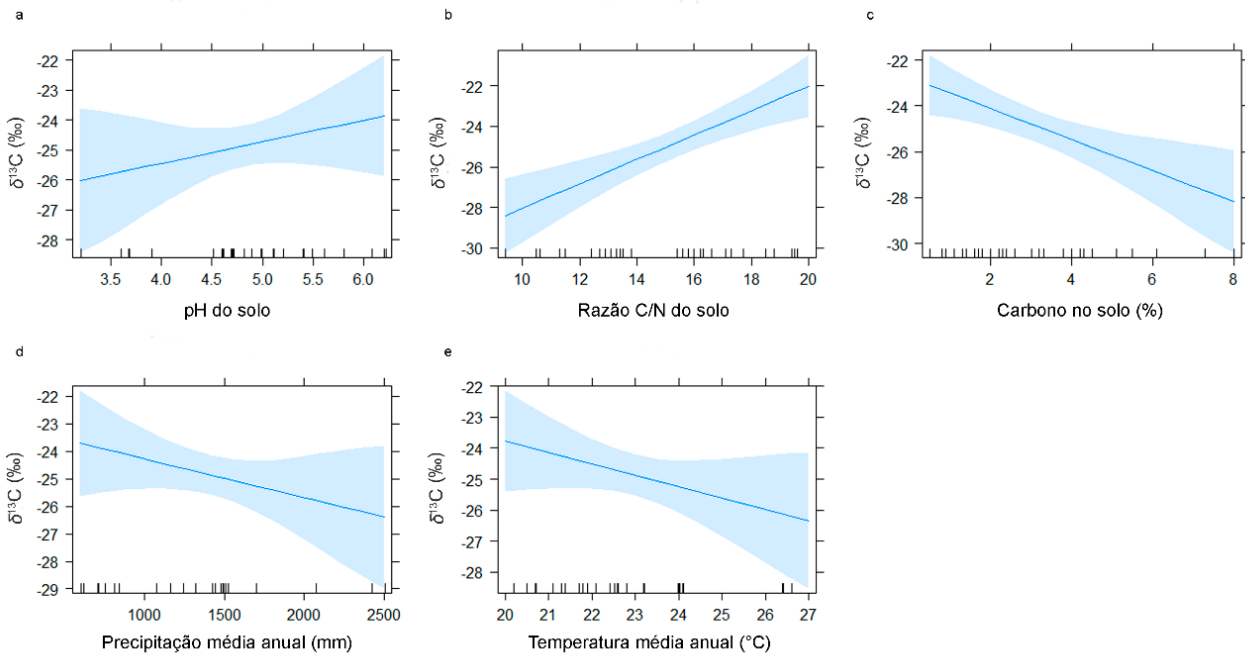


Figura 3: Modelo linear misto entre $\delta^{13}\text{C}$ do solo e a) pH do solo; b) razão C/N do solo; c) Percentual de carbono no solo; d) precipitação média anual; e) temperatura média anual no Brasil. Relações “b” e “c” são significativas ($p < 0,05$). Linhas indicam a interseção e área colorida o erro padrão a 95% de confiança. As marcas internas no eixo X indicam a distribuição dos dados. Dados de precipitação e temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

O modelo de $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil também foi significativo ($p < 0,05$, $F = 11,04$ on 5 and 49 DF, R^2 ajustado = 0,48). Razão C/N do solo (Figura 4b) e MAP (Figura 4d) apresentaram relação significativa ($p < 0,05$) com o $\delta^{15}\text{N}$ do solo individualmente. Os resíduos do modelo

apresentaram distribuição normal (Teste de Shapiro-Wilk: 0,99, $p = 0,85$). Segundo o teste de Cook não há *outliers* na amostragem. Os dados possuem auto-correlação espacial (índice de Moran: 0,55, $p = 0,00$).

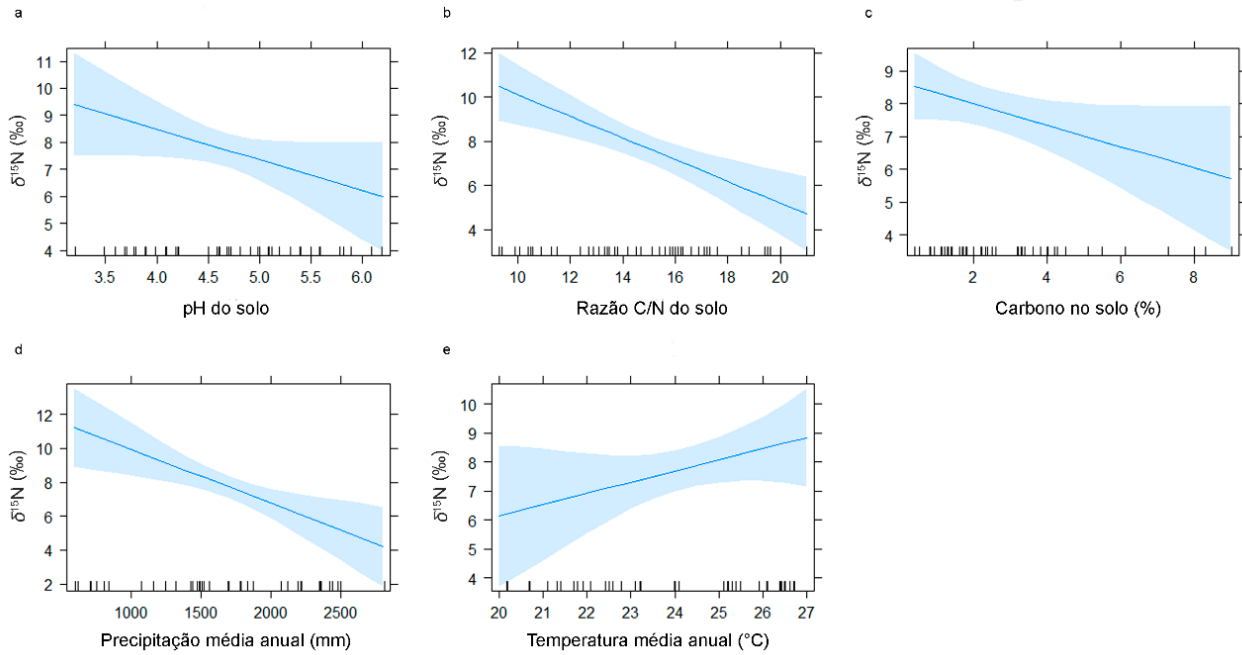


Figura 4: Modelo linear misto entre $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a) pH do solo; b) razão C/N do solo; c) Percentual de carbono no solo; d) precipitação média anual; e) temperatura média anual no Brasil. Relações “b” e “d” são significativas ($p < 0,05$). Linhas indicam a interseção e área colorida o erro padrão a 95% de confiança. As marcas internas no eixo X indicam a distribuição dos dados. Dados de precipitação e temperatura foram extraídos na plataforma WorldClim (www.worldclim.org), com resolução espacial de 30 segundos, correspondente a uma área de $\sim 1 \text{ km}^2$.

A regressão polinomial de $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil com o logMAP (Figura 5a) apresentou relação significativa ($p < 0,05$, $F = 35,52$ on 2 and 256 DF, R^2 ajustado = 0,21), sendo que os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ estão nas zonas com maior e menor precipitação. Também foi significativa a regressão

polinomial entre os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo dos pontos localizados no bioma Amazônia e o MAP dos mesmos pontos ($p < 0,05$, $F = 11,27$ on 2 and 46 DF, R^2 ajustado = 0,30), entretanto a curva de regressão na Amazônia apresenta padrão inverso ao encontrado no Brasil (Figura 5b).

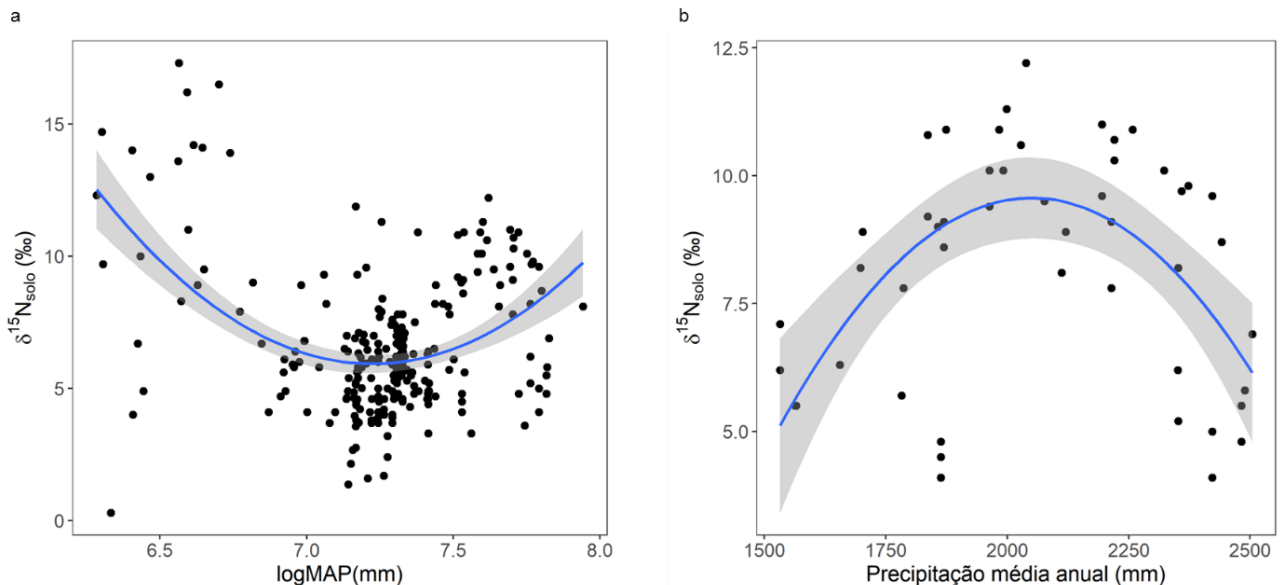


Figura 5: Regressão polinomial entre $\delta^{15}\text{N}$ do solo e a) logaritmo da precipitação média anual no Brasil; b) precipitação média anual no bioma Amazônia. Ambas as relações são significativas ($p < 0,05$). Linhas indicam a interseção e área colorida o erro padrão a 95% de confiança.

Linhas de pesquisa e tendências temporais

Os termos mais encontrados em títulos e resumos de trabalhos publicados que possuem dados de $\delta^{13}\text{C}$ no solo no Brasil ficaram divididos em seis grupos distintos, representados por

diferentes cores (Figura 6a). Os termos mais utilizados em trabalhos publicados com dados de $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil foram divididos em quatro grupos (Figura 6b).

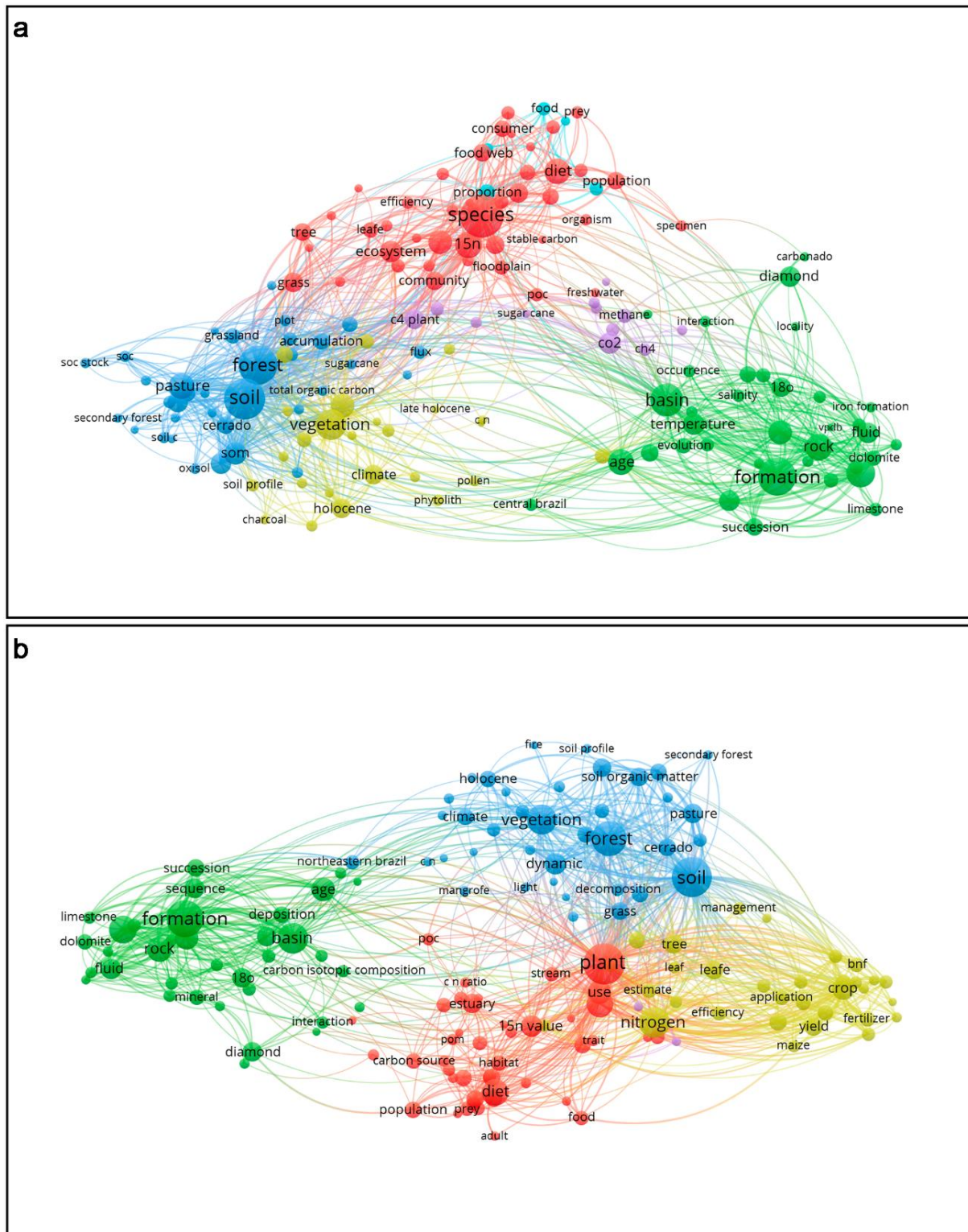


Figura 6: Termos mais encontrados em resumos de trabalhos publicados que possuem dados de a) $\delta^{13}\text{C}$ e b) $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil. Maiores círculos indicam maior frequência com que o termo é citado. Cores diferentes indicam grupos de termos mais relacionados. Linhas mais fortes indicam termos comumente encontrados na mesma publicação.

A Figura 7 apresenta os termos mais encontrados em títulos e resumos de trabalhos publicados que possuem dados de $\delta^{13}\text{C}$ (Figura 7a)

e $\delta^{15}\text{N}$ (Figura 7b) no solo no Brasil entre 2006 e 2023. Os dados estão separados por cores relacionados a ocorrência dos termos em cada ano.

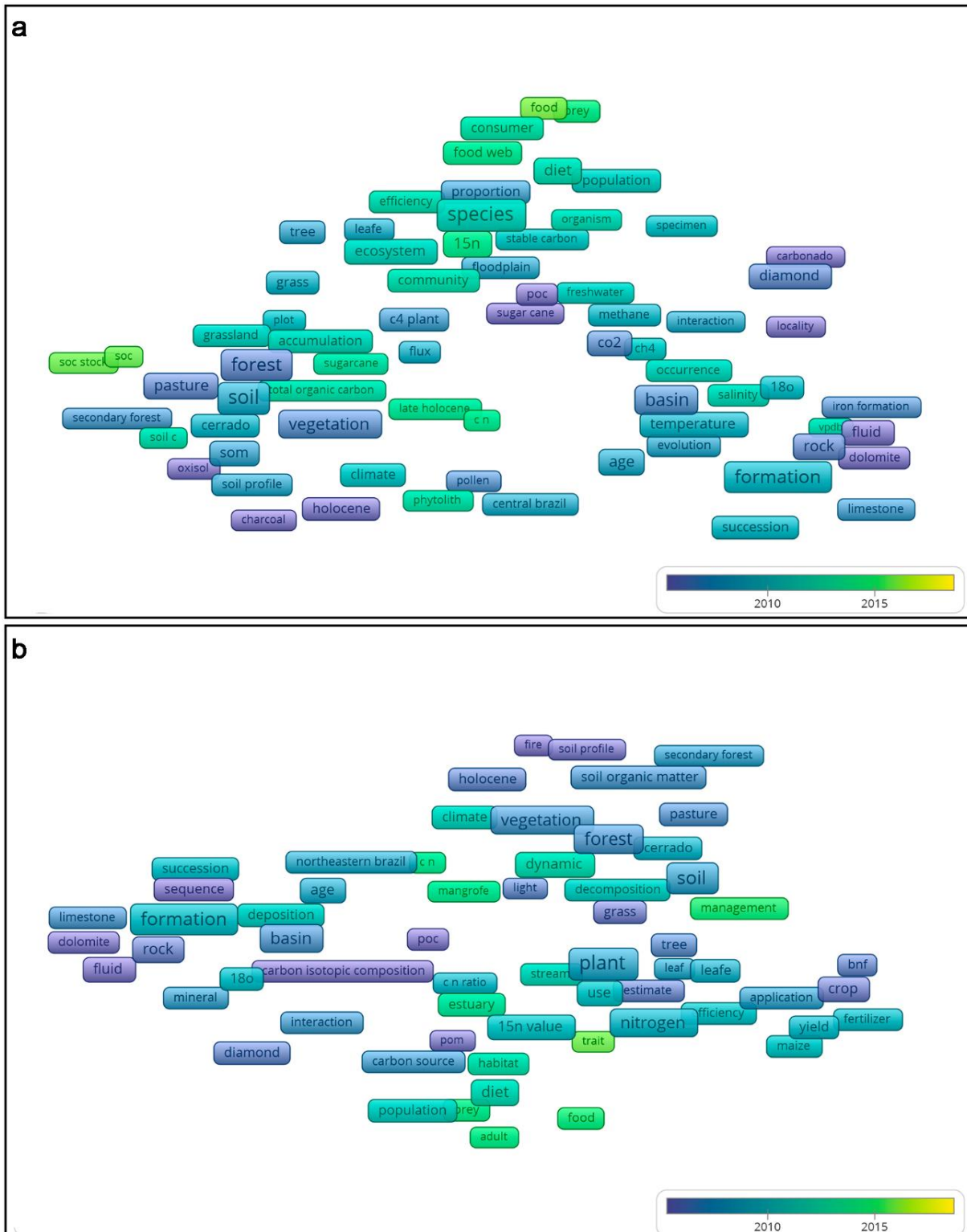


Figura 7: Termos mais encontrados em resumos de trabalhos publicados que possuem dados de a) $\delta^{13}\text{C}$ e b) $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil entre 2006 e 2023. Termos em retângulos azuis foram mais usados nos primeiros anos e nos retângulos amarelos foram mais usados nos últimos anos.

Discussão

A capacidade dos isótopos estáveis de C e N do solo integrarem informação sobre o funcionamento dos ecossistemas (Ramon et al., 2024) explica a amplitude de linhas de pesquisa e tendência encontradas na literatura. Existem ao menos quatro grandes linhas de pesquisa, com outras duas secundárias, utilizando o $\delta^{13}\text{C}$ no solo. São as principais: mudanças de uso da terra, clima e vegetação, funcionamento de ecossistemas, e estudos geológicos. As duas primeiras estão relacionadas a estoques e fluxos de carbono no contexto das mudanças ambientais e climáticas, o que influencia na ligação dessas áreas com a emissão de gases do efeito estufa (Lal, 2013a; Bruggemann et al., 2011). A linha de funcionamento de ecossistemas está focada no comportamento das espécies em relação ao meio em que vivem. Por isso a utilização frequente de $\delta^{15}\text{N}$, que contribui para entendimento da cadeia trófica e alimentação dos organismos. A linha de estudos geológicos é utilizada para identificar vegetação e clima no Brasil em períodos prístinos. O $\delta^{13}\text{C}$ em camadas mais profundas do solo podem dar importantes informações paleoecológicas (Pessenda et al., 1998; Gomes et al., 2017; Lorente et al., 2018). Em geral, esses estudos estão relacionados a bacias hidrográficas e formações geológicas.

Em estudos com $\delta^{13}\text{C}$, estoque de carbono no solo e alimentação são os termos utilizados com maior frequência recentemente na literatura. Isso demonstra a preocupação da comunidade científica com a ciclagem de C no contexto das mudanças climáticas e a importância do solo no estoque desse elemento. Os resultados encontrados por Ramon et al. (2024) sugerem que o tipo de solo, combinado com o manejo da vegetação, pode otimizar o potencial de armazenamento de C. Essas tendências mostram o interesse na possível consequência dessas mudanças para os organismos, já que alimentação e atributos funcionais também estão entre os termos mais usados nos estudos com $\delta^{15}\text{N}$. Esses resultados também podem estar sendo influenciados pelos estudos sobre cadeia trófica, que utilizam os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo como valor basal. Os ambientes costeiros estuarinos também são frequentemente citados atualmente, pois têm sofrido grande influência das mudanças ambientais globais (Reis et al., 2019).

Existe uma relação negativa entre os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo e a temperatura no Brasil, seguindo um padrão já encontrado em trabalhos anteriores (Luo et al., 2009). Plantas C_4 tendem a ser mais tolerantes a ambientes áridos e semiáridos.

Entretanto, os valores encontrados em solos da região mais árida do Brasil, a Caatinga, são típicos de plantas C_3 . Por isso, nesse bioma também existe uma relação negativa entre o $\delta^{13}\text{C}$ no solo e a temperatura, tal qual encontrada por Luo et al. (2009) e Rao et al. (2017). Fatores intrínsecos de cada ambiente, como as fontes de luz e de CO_2 são relacionados com a temperatura e influenciam o processo fotossintético das plantas (Bustamante et al., 2004). Além disso, o relevo aparece como um importante fator na distribuição do $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Cerrado (Neves et al., 2021).

Nossos resultados mostram que o $\delta^{13}\text{C}$ do solo nos biomas apresenta diferentes relações com as variáveis climáticas. De forma geral, a precipitação não é um fator determinante para o $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Brasil, embora a disponibilidade de água tenha uma relação com o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas (Ometto et al., 2006; Luo et al., 2009), que depois são depositadas no solo na forma de serapilheira com fracionamento de cerca de 2‰ (Martinelli et al., 1994). Estudos globais mostram uma correlação negativa entre precipitação e $\delta^{13}\text{C}$ de solos com valores C_3 , ≤ -24 ‰, mas essa correlação não existe quando são utilizados solos com valores acima de -24 ‰, que representam mistura entre C_3 e C_4 ou predomínio de C_4 (Rao et al., 2017). Os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ são encontrados justamente nas áreas mais chuvosas, entretanto, os biomas brasileiros são muito heterogêneos em composição de espécies, e pode depositar no solo uma matéria orgânica muito variável mesmo em uma área pequena (Ometto et al., 2006, Ramon et al., 2024). Isso também é corroborado pela ausência de relação significativa entre MAP e $\delta^{13}\text{C}$ dentro de cada bioma. Além disso, as mudanças no uso da terra tendem a aumentar o valor de $\delta^{13}\text{C}$ com a substituição da vegetação nativa tanto em Mata Atlântica quanto em Cerrado (Cordeiro et al., 2020; Lima et al. 2020; Oliveira et al., 2021).

O $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil está relacionado positivamente à temperatura, mas não tem relação com a precipitação. Em modelos globais, existe relação similar com MAT (Amundson et al., 2003; Craine et al., 2015a). Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo aumentam à medida que o N passa pelos processos de mineralização ou decomposição. Ambos processos ocorrem com maior intensidade em locais com temperaturas mais elevadas (Martinelli et al., 1999), o que explica essa relação positiva entre $\delta^{15}\text{N}$ e MAT. Por outro lado, a ausência de relação com MAP difere dos padrões globais encontrados até então (Amundson et al., 2003; Craine et al., 2015). A disponibilidade de água também é um fator essencial para que esses processos ocorram (Freitas et al., 2015). Essa

ausência de relação com a precipitação pode ser explicada pelo acréscimo de pontos amostrais em ecossistemas estratégicos, como o Cerrado e a Caatinga.

O Brasil possui uma alta variabilidade de ecossistemas associados a diferentes regimes de precipitação. A maior quantidade de amostras de $\delta^{15}\text{N}$ do solo em diferentes regiões do Brasil pode revelar relações regionais não-lineares com a precipitação e outras variáveis ambientais (Sena-Souza et al., 2020). Os resultados encontrados no presente estudo mostram que as relações do $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil com a precipitação seguem um padrão quadrático, com maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ nas zonas mais áridas e mais úmidas. Esse padrão é corroborado pelo modelo desenvolvido na América do Sul, que aponta os maiores valores na Caatinga e indicam que o bioma e a precipitação estão entre as três variáveis mais importantes para o modelo (Sena-Souza et al., 2020). Utilizando somente o recorte do bioma Amazônia, nota-se que o padrão quadrático se inverte ao do Brasil, com os maiores valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo em locais com MAP em torno de 2000 mm. Isto demonstra que cada bioma possui dinâmica própria, que condiciona os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo.

A dinâmica da matéria orgânica do solo é diferente em cada bioma no Brasil. Florestas tropicais úmidas (Amazônia e Mata Atlântica) são predominantemente arbóreas, com ciclo fotossintético C_3 , e por isso possuem valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo mais baixos que os outros biomas (Silva Neto et al., 2018). Exceções existem em manchas de savanas ou campos dentro dessas florestas (Freitas et al., 2001; Vidotto et al., 2007; Lins et al., 2016). No presente estudo a Caatinga e o Pantanal apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ similares aos da Amazônia e da Mata Atlântica, proveniente de matéria orgânica oriunda de plantas C_3 . Outros estudos também mostram que a Caatinga possui valores de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -26‰ nas camadas superficiais do solo, menores que áreas de Cerrado e de transição entre eles (Mendonça et al., 2010). Possivelmente isso ocorre devido aos solos terem sido coletados em locais com vegetação predominantemente arbórea. Outra possível explicação é a possibilidade de os solos da Caatinga armazenarem a matéria orgânica oriunda de espécies arbóreas, enquanto a de espécies herbáceas é rapidamente consumida pela biota do solo. No Pantanal existe uma variação causada pela fitofisionomia que varia entre -29‰ e -20‰, que nesse caso está relacionado à posição na paisagem e à dinâmica de alagamento dos solos (Nascimento et al., 2013). A concentração de amostragem em áreas com vegetação mais adensada pode

contribuir para os valores médios serem semelhantes aos de florestas tropicais, especialmente pelo maior estoque e disponibilidade de C e N nas camadas superficiais do solo existentes nesses pontos (Freitas et al., 2024).

As diferenças entre os biomas também são encontradas nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo. Ambientes florestais, com alta temperatura e umidade possuem taxas de decomposição mais acelerada, o que deixa os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo mais altos que em ambientes de savana (Martinelli et al., 1999). Na Amazônia, os valores mais elevados de $\delta^{15}\text{N}$ são encontrados entre 2000 mm e 2400 mm de precipitação média anual, faixa similar ao encontrado por Sena-Souza et al., (2020), mostrando que não há uma relação linear entre precipitação e $\delta^{15}\text{N}$ do solo nesse bioma, corroborado pelos resultados encontrados no presente estudo. O $\delta^{15}\text{N}$ do solo na Amazônia diminui de leste a oeste. Isso porque na região da Amazônia ocidental pode ocorrer uma completa desnitrificação, anulando o efeito do fracionamento e diminuindo os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Houlton et al., 2006). Além disso, a maior quantidade de chuvas também tende a aumentar as perdas de N por erosão e lixiviação, processos que não causam fracionamento.

Na Mata Atlântica, temperatura e precipitação não são tão elevados quanto na Amazônia, resultando em taxa de mineralização menos acelerada e menor $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Martinelli et al., 1999). Já os ambientes semiáridos, como a Caatinga, possuem valores ainda mais altos que as florestas tropicais, devido ao ciclo mais aberto do N em áreas secas (Martinelli et al., 1999), que aumentam as perdas por volatilização, quando o pH é elevado (Aranibar et al., 2004; Menezes et al., 2012; Wang et al., 2014; Ribeiro et al., 2016). Além disso, as chuvas concentradas em um breve período de tempo, aliadas às condições de pH e razão C/N adequadas, permite uma intensificação das transformações do N nesses ambientes, aumentando os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo (Santos et al., 2022, Brunello et al., 2024).

Na Mata Atlântica e na Caatinga os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo diminuem com o aumento da precipitação. Esse padrão é apresentado na literatura em escala global (Amundson et al., 2003; Craine et al., 2015), em savanas africanas (Aranibar et al., 2008) e na própria Caatinga (Freitas et al., 2015). Isso ocorre porque em áreas secas a matéria orgânica está mais associada aos minerais e é mais enriquecida em ^{15}N que a matéria orgânica particulada, mais comum em ambientes mais úmidos (Craine et al., 2015; Conen

et al., 2008). Vitória et al., (2018) mostraram que o $\delta^{15}\text{N}$ das folhas tem diferentes relações com o ambiente de acordo com a variação da precipitação na Mata Atlântica. No entanto, essa relação não ocorre considerando todo o Brasil por conta dos valores altos de $\delta^{15}\text{N}$ encontrados na Amazônia e pela variação local e regional dos processos que controlam a dinâmica no nitrogênio. No Brasil existe uma variedade de ambientes que impedem a linearidade dessa relação. Os valores mais altos, por exemplo, estão nos locais mais áridos e mais chuvosos no Brasil, Caatinga e Amazônia, respectivamente.

No Pantanal, a dinâmica da matéria orgânica do solo e sua relação com as variáveis climáticas diferem dos outros biomas. A relação do $\delta^{15}\text{N}$ do solo é positiva com a precipitação e negativa com a temperatura. O Pantanal possui uma dinâmica própria de alagamento do solo, de acordo com as estações de seca e chuva bem definidas da região, o que condiciona a dinâmica da matéria orgânica do solo (Cardoso et al., 2016). No período seco, os processos de nitrificação e desnitrificação aumentam, tornando o Pantanal uma possível fonte de emissão de N_2O . No entanto, a quantidade de ar presente no solo diminui no período de chuva, inibindo as atividades de vários grupos de organismos presentes no solo, reduzindo os processos de decomposição e mineralização do nitrogênio (Liengaard et al., 2012). Isso resulta em menores valores de $\delta^{15}\text{N}$ em solos pantanosos. Segundo Freitas et al. (2024), a dinâmica do nitrogênio no solo no Pantanal é fortemente influenciada pelo tipo de vegetação e manejo do solo, o que também está refletido nos valores de $\delta^{15}\text{N}$ encontrados no presente estudo.

No Cerrado, o estrato herbáceo contribui ativamente para a formação da matéria orgânica do solo, embora também haja contribuição dos estratos arbustivos e arbóreos. Por conta disso, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ desse bioma ficam em torno de -22‰ (Guareschi et al., 2014; Sant-Anna et al., 2017). Solos sob fitofisionomias florestais do Cerrado apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo em torno de entre -29‰ e -26‰ (Parron et al., 2004; Miranda et al., 2016; Cordeiro et al., 2020; Oliveira et al., 2021), e nos campos sob vegetação arbustiva ou herbácea entre -20‰ e -14‰ (Lloyd et al., 2008). A isoscape de $\delta^{13}\text{C}$ do solo no Cerrado elaborada por Neves et al. (2021) apresentou os maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ no sul e os menores valores no norte. Esse padrão foi explicado pela combinação de variáveis climáticas, topográficas, de solo e de vegetação, além da pressão imposta pelas mudanças no uso do solo, que influenciam a dinâmica da matéria orgânica principalmente nas

bordas das manchas de vegetação nativa (Ramon et al., 2024). Cordeiro et al. (2020) constataram que mesmo no solo e no sedimento localizado no interior das matas ripárias há uma influência da matéria orgânica proveniente das áreas de pastagem ao redor, indicando que o Cerrado têm sofrido uma grande pressão causado pelas mudanças no uso da terra.

O Cerrado é um ambiente limitado em nitrogênio, com elevada razão C/N e concentração de NH_4^+ no solo, e baixas taxas de mineralização (Nardoto e Bustamante, 2003; Oliveira et al., 2021). Além disso, possui solos profundos e bem drenados e períodos de seca e chuva bem definidos. Por isso, há um déficit de água no solo na maior parte do tempo, que não permite uma atividade tão intensa dos organismos quanto em florestas e, consequentemente, menor valor de $\delta^{15}\text{N}$ no solo do Cerrado (Sena-Souza et al., 2020). Esse mesmo processo aliado à fixação biológica de N, associação das plantas com os organismos do solo e profundidade das raízes que acessam diferentes fontes de N do solo, propicia uma variedade de estratégias das plantas, que se reflete na grande amplitude de valores de $\delta^{15}\text{N}$ foliar depositada no solo em diferentes fitofisionomias do Cerrado (Bustamante et al., 2004; Parron et al., 2004; Catão et al., 2016; Sena-Souza et al., 2023).

No Pampa, o estrato herbáceo predomina em relação ao arbóreo-arbustivo, por isso os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no solo ficam maiores. Em solos superficiais ao longo de um gradiente de vegetação, Andriollo et al. (2017) encontraram valores entre -24‰ em áreas florestais e -14‰ em áreas campestres do Pampa. Em geral, as médias de temperatura do Pampa são menores que dos outros biomas brasileiros, devido às maiores latitudes. Além disso, o bioma possui baixa disponibilidade de N no solo. Por esses motivos, as taxas de decomposição nesse ambiente são menores e, consequentemente, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo são mais baixos (Assad et al., 2013).

Precipitação e temperatura possuem baixo poder de explicação da distribuição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos solos do Brasil, sendo que somente MAT apresentou uma relação significativa com esses isótopos. Isso indica que existem outros fatores, intrínsecos à cada ambiente, influenciando esses valores (Craine et al., 2015a; Osborne et al., 2016; Rasmussen et al., 2018, Sena-Souza et al., 2020). Esses fatores podem ser biológicos, sendo relacionados à fisiologia das plantas que depositam o material no solo ou à associações com outros organismos acima e abaixo do solo (Ometto et al., 2006; Hobbie e Ouimet 2009; Craine et al., 2015b). Eles também podem ser fatores físicos e

químicos do solo nas mais diversas escalas, como material de origem e relevo (Weintraub et al., 2015; Neves et al. 2021), concentração de carbono e teor de argila no solo (Craine et al., 2015a; Conen et al., 2008, Santos et al., 2022), mineralogia do solo (Singh et al., 2017); ou razão C/N e o pH do solo (Aranibar et al., 2004; Wang et al., 2014; Osborne et al., 2016; Santos et al., 2022).

O modelo empregado em nosso estudo mostra que o poder de explicação aumenta drasticamente quando fatores ambientais são usados como preditores de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ nos solos do Brasil. A razão C/N e a concentração de C no solo influenciaram o $\delta^{13}\text{C}$ do solo. Isso demonstra a importância da disponibilidade dos nutrientes, da qualidade da matéria orgânica depositada no solo e das condições ambientais no controle dos processos de fotossíntese e decomposição. Além disso, a razão C/N do solo influenciou negativamente os valores de $\delta^{15}\text{N}$ no solo no Brasil, numa relação já relatada em outros ambientes (Aranibar et al., 2004; Conen et al., 2008; Osborne et al., 2016; Sena-Souza et al., 2020). A limitação do ambiente por nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica são essenciais para a ciclagem do nitrogênio, especialmente em escalas regionais e locais, onde esse fator se sobrepõe aos fatores climáticos.

Conclusões

O uso do $\delta^{13}\text{C}$ no solo em pesquisas científicas no Brasil está relacionado ao estoque de carbono e mudanças no uso da terra, enquanto o uso do $\delta^{15}\text{N}$ está relacionado à dinâmica de N no ambiente e ao longo da cadeia trófica. Nos últimos anos o foco das pesquisas está no estoque de carbono no solo, nos atributos funcionais das espécies e no funcionamento dos ecossistemas. Todos esses fatores estão vinculados às mudanças ambientais globais, o que fortalece a importância dos estudos com $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo para o funcionamento dos ecossistemas.

O clima influencia o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$ no solo de biomas brasileiros de maneiras distintas. O $\delta^{13}\text{C}$ apresenta relação com a temperatura, mas não com precipitação, tanto em termos globais, quanto nos recortes locais. Os outros fatores que contribuem o padrão de distribuição do $\delta^{13}\text{C}$ no solo foram razão C/N e concentração de C no solo. Além do fato de que esses dois fatores refletem a cobertura vegetal, os valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ no solo diferem em cada bioma, de acordo com o tipo de vegetação predominante em cada um, o que contribui para corroborar a hipótese inicial do presente estudo.

Os valores de $\delta^{15}\text{N}$ do solo no Brasil estão fortemente relacionados à precipitação, embora a

razão C/N do solo também tenha se mostrado importante nos resultados aqui apresentados. A hipótese relacionada ao $\delta^{15}\text{N}$ também indicava uma relação com a temperatura, o que não ocorreu. Concluímos ainda que a forma como o $\delta^{15}\text{N}$ se relaciona com as variáveis climáticas e ambientais difere em cada bioma.

Utilizar variáveis climáticas aliadas a variáveis ambientais se mostrou uma ferramenta útil para o entendimento da dinâmica da matéria orgânica do solo no Brasil. Ambas as variáveis mostraram importantes relações com o $\delta^{13}\text{C}$ e o $\delta^{15}\text{N}$, principalmente quando inseridas em um mesmo modelo.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projeto “Desenvolvimento e aperfeiçoamento de metodologias baseadas em marcadores moleculares e isótopos estáveis aplicáveis no combate aos crimes contra a fauna brasileira” junto à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Edital 25/2014 - Programa Ciência Forenses (Pró-Forenses). Nós agradecemos ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq - pelo financiamento (bolsa de estudo para o primeiro autor). Contamos também com o Apoio de Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG (Universal APQ-02912-21).

Referências

- Amundson, R.G., Austin, A.T., Schuur, E.A.G., Yoo, K., Matzek, V., Kendall, C., Uebersax, A., Brenner, D., Baisden, W.T., 2003. Global Patterns of the Isotopic Composition of Soil and Plant Nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): 10.
- <https://doi.org/10.1029/2002GB001903>.
- Andriollo, D.D., Redin, C.G., Reichert, J.M., Silva, L.S., 2017. Soil Carbon Isotope Ratios in Forest-Grassland Toposequences to Identify Vegetation Changes in Southern Brazilian Grasslands. *Catena* 159 (August): 126–35.
- <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.08.012>.
- Aranibar, J.N., Anderson, I.C., Epstein, H.E., Feral, C.J.W., Swap, R.J., Ramontsho, J., Macko, S.A., 2008. Nitrogen Isotope Composition of Soils, C3 and C4 plants along Land Use Gradients in Southern Africa. *Journal of Arid Environments* 72 (4): 326–37.
- <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.007>.
- Aranibar, J.N., Otter, L., Macko, S.A., Feral, C.J.W., Epstein, H.E., Dowty, P.R., Eckardt, F.,

- Shugart, H.H., Swap, R.J., 2004. Nitrogen Cycling in the Soil-plant System along a Precipitation Gradient in the Kalahari Sands. *Global Change Biology* 10: 359–73.
- Assad, E.D., Pinto, H.S., Martins, S.C., Groppo, J.D., Salgado, P.R., Evangelista, B., Vasconcelos, E., 2013. Changes in Soil Carbon Stocks in Brazil Due to Land Use : Paired Site Comparisons and a Regional Pasture Soil Survey. *Biogeosciences* 10: 6141–60. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013>.
- Bruggemann, N., Gessler, A., Kayler, Z., Keel, S.G., Badeck, F., Barthel, M., Boeckx, P., 2011. Carbon Allocation and Carbon Isotope Fluxes in the Plant-Soil-Atmosphere Continuum: A Review. *Biogeosciences* 8: 3457–89. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3457-2011>.
- Brunello, A.T., Nardoto, G.B., Santos, F.L.S., Sena-Souza, J.P., Quesada, C.A.N., Lloyd, J.J., Domingues, T.F., 2024. Soil $\delta^{15}\text{N}$ spatial distribution is primarily shaped by climatic patterns in the semiarid Caatinga, Northeast Brazil. *Science of The Total Environment* 908, 168405. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168405>
- Bustamante, M.M.C., Martinelli, L.A., Silva, D.A., Camargo, P.B., Klink, C., Domingues, T.F., Santos, R.V., 2004. ^{15}N Natural Abundance in Woody Plants and Soils of Central Brazilian Savannas (Cerrado). *Ecological Applications* 14 (August 2016): S200–213. <https://doi.org/10.1890/01-6013>.
- Cardoso, E.L., Santos, S.A., Urbanetz, C., Carvalho Filho, A., Naime, U.J., Silva, M.L.N., Curi, N., 2016. Relação Entre Solos e Unidades Da Paisagem No Ecossistema Pantanal. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 51 (9): 1231–40. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900023>.
- Catão, E.C.P., Lopes, F.A.C., Rubini, M.R., Nardoto, G.B., Prosser, J.I., 2016. Short-Term Impact of Soybean Management on Ammonia Oxidizers in a Brazilian Savanna under Restoration as Revealed by Coupling Different Techniques. *Biology and Fertility of Soils* 52: 401–12. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1086-0>.
- Chapin, F.S., Matson, P.A., Vitousek, P., 2011. *Principles of terrestrial ecosystem ecology* (2nd ed.). Springer.
- Conen, F., Zimmermann, M., Leifeld, J., Seth, B., Alewell, C., 2008. Relative Stability of Soil Carbon Revealed by Shifts in $\delta^{15}\text{N}$ and C:N Ratio. *Biogeosciences* 5: 123–28.
- Cordeiro, G.G., Vasconcelos, V., Salemi, L.F., Nardoto, G.B., 2020. Factors affecting the effectiveness of riparian buffers in retaining sediment: an isotopic approach. *Environ Monit Assess* 192, 735 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08705-4>
- Craine, J.M., Brookshire, E.N.J., Cramer, M.D., Hasselquist, N.J., Koba, K., Marin-Spiotta, E., Wang, L., 2015. Ecological Interpretations of Nitrogen Isotope Ratios of Terrestrial Plants and Soils. *Plant and Soil* 396 (1–2): 1–26. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2542-1>.
- Craine, J.M., Elmore, A.J., Wang, L., Augusto, L., Baisden, W.T., Brookshire, E.N.J., Cramer, M.I.D., 2015. Across Global Climate Gradients. *Scientific Reports* 5: 1–8. <https://doi.org/10.1038/srep08280>.
- Ehleringer, J.R., Bowling, D.R., Flanagan, L.B., Fessenden, J., Helliker, B., Martinelli, L.A., Ometto, J.P., 2002. Stable Isotopes and Carbon Cycle Processes in Forests and Grasslands. *Plant Biology* 4: 181–89.
- Ehleringer, J.R., Buchmann, N., Flanagan, L.B., 2000. Carbon Isotope Ratios in Belowground Carbon Cycle Processes. *Ecological Applications* 10 (2): 412–422. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0412:CIRIBC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0412:CIRIBC]2.0.CO;2).
- Freitas, A.D.S., Sampaio, E.V., Ramos, A.P.S., Barbosa, M.R.V., Lyra, R.P., Araújo, E.L., 2015. Nitrogen Isotopic Patterns in Tropical Forests along a Rainfall Gradient in Northeast Brazil. *Plant and Soil* 391 (1–2): 109–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2417-5>.
- Freitas, D.A.F., Silva, M.L.N., Cardoso, E.L., Oliveira, D.M.S., Moitinho, M.R., Curi, N., 2024. Carbon and Nitrogen Stocks in Soil under Native Pastures in the Pantanal Wetland Biome, Brazil. *Agronomy* 2024, 14, 1994. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091994>
- Freitas, H.A., Pessenda, L.C.R., Aravena, R., Gouveia, S.E., Ribeiro, A., Boulet, R., 2001. Late Quaternary Vegetation Dynamics in the Southern Amazon Basin Inferred from Carbon Isotopes in Soil Organic Matter. *Quaternary Research* 55 (1): 39–46. <https://doi.org/10.1006/qres.2000.2192>.
- Friedlingstein, P., Jones, M.W., O'Sullivan, M., Andrew, R.M., Bakker, D.C.E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S.R., Anthoni, P., Bates, N.R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T.T.T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Evans, W., Feely, R.A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Houghton, 1955

- R.A., Hurtt, G.C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijkx, I. T., Jain, A., Jones, S.D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J.I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P.C., Melton, J.R., Munro, D.R., Nabel, J.E.M.S., Nakaoka, S.I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T.M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A.J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P.P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G.R., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A.J., Willis, D., Wiltshire, A.J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., 2022. Global Carbon Budget 2021, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1917–2005, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1917-2022>.
- Gomes, M.O.S., Meyer, K.E.B., Pessenda, L.C.R., 2017. Reconstituição Paleoambiental da Vereda Carrasco da Raposa, Parque estadual da Serra do Cabral, MG, Brasil, por meio de estudos palinológico e isotópico. *Pesquisas em Geociências* 44 (1): 41–62.
- Guareschi, R.F., Pereira, M.G., Perin, A., 2014. Carbono, Nitrogênio e Abundância Natural de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ Em Uma Cronosequência de Agricultura Sob Plantio Direto No Cerrado Goiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38: 1135–42.
- Hobbie, E.A., Ouimette, A.P., 2009. Controls of Nitrogen Isotope Patterns in Soil Profiles. *Biogeochemistry* 95 (2): 355–71. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9328-6>.
- Hogberg, P., 1997. ^{15}N Natural Abundance in Soil-Plant Systems. *New Phytologist* 137: 179–203. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1997.00808.x>.
- Houlton, B.Z., Sigman, D.M., Hedin, L.O., 2006. Isotopic Evidence for Large Gaseous Nitrogen Losses from Tropical Rainforests. *PNAS* 23 (6): 8745–50. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0510185103.
- Houlton, B.Z., Sigman, D.M., Schuur, E.A.G., Hedin, L.O., 2007. A Climate-Driven Switch in Plant Nitrogen Acquisition within Tropical Forest Communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (21): 8902–6. <https://doi.org/10.1073/PNAS.0609935104>.
- Kirsten, M., Mikutta, R., Vogel, C., Thompson, A., Mueller, C.W., Kimaro, D.N., Bergsma, H.L. T., Feger, K.H., Kalbitz, K., 2021. Iron oxides and aluminous clays selectively control soil carbon storage and stability in the humid tropics. *Scientific Reports*, 11, 5076. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84777-7>
- Jenny, H., 1941. Factors of soil formation. A System of Quantitative Pedology. Edited by Ronald Amundson. New York.
- Lal, R., 2013a. Soil Carbon Management and Climate Change. *Carbon Management* 4: 439–62. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.31>.
- Lal, R., 2013b. Intensive Agriculture and the Soil Carbon Pool. *Journal of Crop Improvement* 27: 735–52. <https://doi.org/10.1080/15427528.2013.845053>.
- Liengaard, L., Nielsen, L.P., Revsbech, N.P., Priemé, A., Elberling, B., Enrich-Prast, A., Kühl, M., 2012. Extreme Emission of N_2O from Tropical Wetland Soil (Pantanal, South America). *Frontiers in Microbiology* 3 (JAN): 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00433>.
- Lima, H.N.B., Coelho, J.J., Dubeux Júnior, J.C.B., Santos, E.R.S., Cunha, M.V., Mello, A.C.L., Santos, M.V.F., 2020. Soil chemical changes and resemblances in a chronosequence rainforest-sugarcane-pastureland in the Atlantic forest biome. *CERNE*, v. 26, n. 4, p.444-455. DOI: 10.1590/01047760202026042745.
- Lins, S.R.M., Coletta, L., Ravagnani, E.C., Gragnani, J.G., Mazzi, E.A., Martinelli, L.A., 2016. Stable Carbon Composition of Vegetation and Soils across an Altitudinal Range in the Coastal Atlantic Forest of Brazil. *Trees - Structure and Function* 30 (4): 1315–29. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1368-7>.
- Lloyd, J., Bird, M.I., Vellen, L., Miranda, A.C., Veenendaal, E.M., Djagbletey, G., Miranda, H.S., Cook, G., Farquhar, G.D., 2008. Contributions of Woody and Herbaceous Vegetation to Tropical Savanna Ecosystem Productivity: A Quasi-Global Estimate. *Tree Physiology* 28 (3): 451–68. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.3.451>.
- Lorente, F.L., Pessenda, L.C.R., Oboh-Ikuenobe, F., Buso Junior, A.A., Rossetti, D.F., Giannini, P.C.F., Cohen, M.C.L., 2018. An 11,000-Year Record of Depositional Environmental Change Based upon Particulate Organic Matter and Stable Isotopes (C and N) in a Lake Sediment in Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 84 (July): 373–84. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.006>.
- Luo, T., Zhang, L., Zhu, H., Daly, C., Li, M., Luo, J., 2009. Correlations between Net Primary Productivity and Foliar Carbon Isotope Ratio across a Tibetan Ecosystem Transect. *Ecography* 32 (3): 526–38. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05735.x>.
- Martinelli, L.A., Piccolo, M.C., Townsend, A.R., Vitousek, P.M., Cuevas, E., McDowell, W.,

- Robertson, G.P., O C Santos, and K Treseder. 1999. "Nitrogen Stable Isotopic Composition of Leaves and Soil: Tropical versus Temperate Forests." *Biogeochemistry* 46: 45–65.
- Martinelli, L.A., Victoria, R.L., Forsberg, B.R., Richey, J.E., 1994. Isotopic Composition of Majors Carbon Reservoirs in the Amazon Floodplain. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences* 20: 31–46.
- Mendonça, L., Frischkor, H., Santiago, M., Camargo, P.B., Lima, J.O.G., Mendes Filho, J., 2010. Identificação de Mudanças florestais por δC e δN dos solos da Chapada do Araripe, Ceará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 14 (March): 314–19. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000300012>.
- Menezes, R.S.C., Sampaio, E.V., Giongo, V., Pérez-Marin, A.M., 2012. Biogeochemical Cycling in Terrestrial Ecosystems of the Caatinga Biome. *Brazilian Journal of Biology* 72 (3 suppl): 643–53. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.
- Miranda, E., Carmo, J., Couto, E., Camargo, P.B., 2016. Long-Term Changes in Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado under Commercial Soybean. *Land Degradation and Development* 27 (6): 1586–94. <https://doi.org/10.1002/ldr.2473>.
- Nardoto, G.B., Bustamante, M.M.C., 2003. Effects of Fire on Soil Nitrogen Dynamics and Microbial Biomass in Savannas of Central Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38 (1): 955–62.
- Nardoto, G.B., Ometto, J.P., Ehleringer, J.R., Higuchi, N., Bustamante, M.M.C., Martinelli, L.A., 2008. Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest. *Ecosystems* 11 (April): 1234–46. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9189-1>.
- Nardoto, G.B., Quesada, C.A., Patiño, S., Saiz, G., Baker, T.R., Schwarz, M., Schrod, F., 2014. Basin-Wide Variations in Amazon Forest Nitrogen-Cycling Characteristics as Inferred from Plant and Soil ^{15}N : ^{14}N Measurements. *Plant Ecology and Diversity* 7 (1–2): 173–87. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.807524>.
- Nascimento, A.F., Furquim, S.A.C., Couto, E.G., Beirigo, R.M., Oliveira Júnior, J.C., Camargo, P.B., Vidal-Torrado, P.V., 2013. Genesis of Textural Contrasts in Subsurface Soil Horizons in the Northern Pantanal - Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, no. 37: 1113–27.
- Neves, G., Sena-Souza, J.P., Santos, F.L.S., Sano, E.E., Nardoto, G.B., Couto Júnior, A.F., 2021. Spatial distribution of soil $\delta^{13}C$ in the central Brazilian savanna. *Journal of Environmental Management* 300, 113758. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113758>
- Oliveira, N.S., Schiavo, J.A., Lima, M.F., Laranjeira, L.T., Nunes, G.P., Cruz, S.C., 2021. Isotopic variations of carbon and nitrogen and their implications on the conversion of Cerrado vegetation into pasture. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v.56 n.2 , 266-273.. <https://doi.org/10.5327/Z21769478845>
- Ometto, J.P., Ehleringer, J.R., Domingues, T.F., Berry, J.A., Ishida, F.Y., Mazzi, E., Higuchi, N., Flanagan, L.B., Nardoto, G.B., Martinelli, L.A., 2006. The Stable Carbon and Nitrogen Isotopic Composition of Vegetation in Tropical Forests of the Amazon Basin, Brazil. *Biogeochemistry* 79 (July): 251–74. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5517-1>.
- Osborne, B.B., Nasto, M.K., Asner, G.P., Christopher, S., Cleveland, C.C., Sullivan, B.W., Taylor, P.G., Townsend, A.R., Porder, S., 2016. Climate, Topography, and Canopy Chemistry Exert Hierarchical Control Over Soil N Cycling in a Neotropical Lowland Forest. *Ecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0095-7>.
- Parron, L.M., Bustamante, M.M.C., Camargo, P.B., 2004. Composição Isotópica de Carbono e Nitrogênio Em Solos e Plantas de Uma Mata de Galeria: Efeito Do Gradiente Topográfico. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Cerrados* 127: 24.
- Pessenda, L.C.R., Gomes, B.M., Aravena, R., Ribeiro, A.S., Boulet, R., Gouveia, S.E.M., 1998. The Carbon Isotope Record in Soils along a Forest-Cerrado Ecosystem Transect: Implications for Vegetation Changes in the Rondonia State, Southwestern Brazilian Amazon Region. *Holocene* 8 (5): 599–603. <https://doi.org/10.1191/095968398673187182>.
- Peterson, B.J., Fry, B., 1987. Stable Isotopes in Ecosystem. *Annual Reviews in Ecological Systems* 18: 293–320.
- Powell, R., Yoo, E.H., Still, C.J., 2012. Vegetation and Soil Carbon-13 Isoscapes for South America: Integrating Remote Sensing and Ecosystem Isotope Measurements. *Ecosphere* 3 (November): 25.
- Rao, Z., Guo, W., Cao, J., Shi, F., Jiang, H., Li, C., 2017. Relationship between the Stable Carbon Isotopic Composition of Modern Plants and Surface Soils and Climate: A Global Review. *Earth-Science Reviews* 165 (December): 110–19. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.007>.

- Ramon, M., Laforteza, R., Ribeiro, A.P., Camargo, P.B., Domingos, M., Gomes, E.P.C., Tavares, A.R., Dias, A.G., Knies, C.T., Ferreira, M.L., 2024. Carbon and nitrogen stock in soils of subtropical urban forests: Isotopic $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ indicators for nature-based solutions in a megacity. *Ecological Indicators* 160. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111743>
- Rasmussen, C., Heckman, K., Wieder, W.R., Keiluweit, M., Lawrence, C.R., Berhe, A.A., Blankinship, J.C., 2018. Beyond Clay: Towards an Improved Set of Variables for Predicting Soil Organic Matter Content. *Biogeochemistry* 137 (3): 297–306. <https://doi.org/10.1007/s10533-018-0424-3>.
- Reis, C.R.G., Reed, S.C., Oliveira, R.S., Nardoto, G.B., 2019. Isotopic Evidence That Nitrogen Enrichment Intensifies Nitrogen Losses to the Atmosphere from Subtropical Mangroves. *Ecosystems*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0327-0>.
- Ribeiro, K., Sousa-Neto, E.R., Carvalho Junior, J.A., Lima, J.R.S., Menezes, R.S.C., Duarte-Neto, P.J., Guerra, G.S., Ometto, J.P., 2016. Land Cover Changes and Greenhouse Gas Emissions in Two Different Soil Covers in the Brazilian Caatinga. *Science of the Total Environment* 571: 1048–57. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>.
- Robinson, D., 2001. $\delta^{15}\text{N}$ as an Integrator of the Nitrogen. *Trends in Ecology & Evolution* 16 (3): 153–62.
- Sant-Anna, S.A.C., Jantalia, C.P., Sá, J.M., Vilela, L., Marchão, R.L., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2017. Changes in Soil Organic Carbon during 22 Years of Pastures, Cropping or Integrated Crop/Livestock Systems in the Brazilian Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108 (1): 101–20. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9812-z>.
- Santos, F.L.S., Vasconcelos, V., Jesus, K., Neves, G., Sena-Souza, J.P., Couto Junior, A.F., Sampaio, E.V., Ometto, J.P., Menezes, R.S.C., Nardoto, G.B., 2022. Climatic control effect on the soil nitrogen isotopic composition in Alisols across the physiographic regions of Pernambuco State, Northeast Brazil, Northeast Brazil. *Geoderma Regional* 30 e00565. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00565>
- Sena-Souza, J.P., Houlton, B.Z., Martinelli, L.A., Nardoto, G.B., 2020. Reconstructing continental scale variation in soil $\delta^{15}\text{N}$: a machine learning approach in South America. *Ecosphere* 11(8):e03223. [10.1002/ecs2.3223](https://doi.org/10.1002/ecs2.3223)
- Sena-Souza, J.P., Rodovalho, N.L., Andrade, A.F., Pinto, J.R., Nardoto, G.B., 2023. Mapping the effects of *Melinis minutiflora* invasion on soil nitrogen dynamics in the Brazilian savanna: A dual-isotope approach. *Pedobiologia - Journal of Soil Ecology* 96. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2023.150863>
- Silva Neto, E.C., Calegari, M.R., Pereira, M.G., Maranhão, D.D.C., Schiavo, J.A., Fontana, A., Fernandes, J.C.F., 2018. Phytoliths as Indicators of Pedogenesis and Paleoenvironmental Changes in Spodosols of the State of Rio de Janeiro, Brazil. *Science of the Total Environment* 636: 1070–80. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.313>.
- Singh, M., Sarkar, B., Sarkar, S., Churchman, J., Bolan, N., Mandal, S., Menon, M., Purakayastha, T.J., Beerling, D.J., 2017. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy. *Advances in Agronomy*. 1st ed. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.001>.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., 2015. Planetary Boundaries: Guiding Human Development on a Changing Planet. *Science (New York, N.Y.)* 348 (6240): 1217. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9629>.
- Templer, P.H., Mack, M.C., Chapin, F.S., Christenson, L.M., Compton, J.E., Crook, H.D., Currie, W.S., 2012. Sinks for Nitrogen Inputs in Terrestrial Ecosystems: A Meta-Analysis of 15 N Tracer Field Studies. *Ecology* 93 (June 2011): 1816–29.
- Vidotto, E., Pessenda, L.C.R., Ribeiro, A.S., Freitas, H.A., Bendassolli, J.A., 2007. Dinâmica do ecótono floresta-campo no sul do estado do Amazonas no Holoceno, através de estudos isotópicos e fitossociológicos. *Acta Amazonica* 37 (3): 385–400. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000300010>.
- Vitória, A.P., Ávila-Lovera, E., Vieira, T.O., Couto-Santos, A.P.L., Pereira, T.J., Funch, L.S., Freitas, L., 2018. Isotopic Composition of Leaf Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and Nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) of Deciduous and Evergreen Understorey Trees in Two Tropical Brazilian Atlantic Forests. *Journal of Tropical Ecology* 34 (2): 145–56. <https://doi.org/10.1017/S0266467418000093>.
- Wang, C., Wang, X., Liu, D., Wu, H., Lu, X., Fang, Y., Cheng, W., 2014. Aridity Threshold in Controlling Ecosystem Nitrogen Cycling in Arid and Semi-Arid Grasslands. *Nature Communications* 5: 8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5799>.
- Weintraub, S.R., Taylor, P.G., Porder, S., Cleveland, C.C., Asner, G.P., Townsend, A.R., 2015. Topographic Controls on Soil Nitrogen

Availability in a Lowland Tropical Forest.
Ecology 96 (6): 1561–74.