



**INSTITUTO FEDERAL GOIANO**  
*CAMPUS RIO VERDE*  
**AGRONOMIA**

**MARIANA TEIXEIRA BORGES**

**FLUXO DE GASES DO EFEITO ESTUFA DO SOLO SOB DIFERENTES  
COBERTURAS NAS ESTAÇÕES DO ANO**

**RIO VERDE**  
**2026**

MARIANA TEIXEIRA BORGES

**FLUXO DE GASES DO EFEITO ESTUFA DO SOLO SOB DIFERENTES  
COBERTURAS NAS ESTAÇÕES DO ANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia do Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde, como parte da exigência para obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Orientador(a): Dr. Tiago do Prado Paim

Coorientador(a): Dr. Josiel Borges Ferreira

RIO VERDE  
2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

T266f Teixeira Borges, Mariana  
FLUXO DE GASES DO EFEITO ESTUFA DO SOLO SOB  
DIFERENTES COBERTURAS NAS ESTAÇÕES DO ANO /  
Mariana Teixeira Borges. Rio Verde 2026.  
37f. il.  
Orientador: Prof. Dr. Tiago do Prado Paim.  
Coorientador: Prof. Dr. Josiel Borges Ferreira.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -  
Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio  
Verde).  
1. Gases do efeito estufa. 2. Fluxo de gases no solo. 3. Manejo do  
solo. 4. Sazonalidade. 5. Sistemas agroflorestais. I. Título.

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)            | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)      | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação)  | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Mariana Teixeira Borges

Matrícula:

2022102200240089

Título do trabalho:

FLUXO DE GASES DO EFEITO ESTUFA DO SOLO SOB DIFERENTES COBERTURAS NAS ESTAÇÕES DO ANO

### RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde-GO

Local

19 / 06 / 2026

Data

Documento assinado digitalmente



MARIANA TEIXEIRA BORGES

Data: 19/06/2026 10:54:51-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente



TIAGO DO PRADO PAIM

Data: 19/06/2026 11:34:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 17/2026 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos três dias do mês de junho de 2026, às 08:00 horas, reuniu-se, de forma presencial, a banca examinadora composta pelos membros: Dr. Tiago do Prado Paim (orientador), Prof. Dr. Gustavo Castoldi (membro/IF Goiano - Campus Rio Verde) e Dr. Fernando Rodrigues Cabral Filho (membro/IF Goiano - Campus Rio Verde) para examinar o Trabalho de Curso intitulado "**Fluxo de gases do efeito estufa do solo sob diferentes coberturas nas estações do ano**" do discente Mariana Teixeira Borges, matrícula nº 2022102200240089 do Curso de Bacharelado em Agronomia do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros avaliadores.

*(Assinado Eletronicamente)*

Tiago do Prado Paim

Orientador

*(Assinado Eletronicamente)*

Gustavo Castoldi

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

Fernando Rodrigues Cabral Filho

Membro

**Observação:**

( ) O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Tiago do Prado Palm, Tiago do Prado Palm - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500)**, em 03/06/2026 09:38:50.
- **Fernando Rodrigues Cabral Filho, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO - VISITANTE**, em 03/06/2026 09:44:05.
- **Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 03/06/2026 09:58:24.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 826423

**Código de Autenticação:** 67e100a275



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3624-1000

*Dedico este trabalho a Deus, à minha família e a todos que me apoiaram, incentivaram e contribuíram para minha trajetória, tornando possível a realização desse sonho tão importante*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre me guiar pelos melhores caminhos, ajudar nas minhas escolhas e me dar forças para enfrentar os desafios encontrados ao longo dessa trajetória.

Agradeço imensamente à minha mãe Marcela, ao meu irmão Sérgio e à minha cunhada Julyana, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, principalmente quando tive medo e insegurança ao iniciar esse novo ciclo da minha vida. Obrigada por todo o apoio, incentivo, compreensão e carinho. Vocês foram fundamentais para que eu não desistisse diante das dificuldades e acreditasse mais em mim mesma. E a toda a minha família que sempre me apoiou.

Ao meu namorado Ícaro, por toda a paciência, companheirismo, apoio e incentivo ao longo dessa caminhada. Sempre estando ao meu lado nos momentos bons e ruins, sempre me motivando a continuar e acreditando no meu potencial até mesmo quando eu duvidava de mim.

Agradeço também a minha amiga Rafaela, que fez parte dessa jornada desde o início e tornou essa caminhada mais leve e especial. Obrigada pelos conselhos, pelas conversas, pelo apoio nos momentos de desespero.

Aos meus orientadores, tanto à minha antiga orientadora Darliane quanto ao meu atual orientador Tiago e coorientador Josiel, expresso minha profunda gratidão por toda a dedicação, paciência, ensinamentos e confiança depositada em mim durante o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada por contribuírem não apenas para minha formação acadêmica, mas também para meu crescimento profissional.

Também agradeço a todos os grupos, equipes e pessoas com quem tive a oportunidade de trabalhar durante a graduação. Cada experiência vivida contribuiu de alguma forma para minha formação, agregando conhecimentos, amadurecimento e aprendizado que serão levados para minha vida profissional.

Por fim, agradeço aos professores do curso de Agronomia, pelos ensinamentos, pela dedicação e pela contribuição na construção da profissional que estou me tornando. Agradeço ainda a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação acadêmica, tornando possível a realização deste sonho.

Ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas exclusivamente como apoio à revisão gramatical, organização textual e adequação da linguagem acadêmica, mantendo-se integralmente a autoria, interpretação dos resultados e responsabilidade científica da autora

“Entrego o teu caminho ao Senhor, confia nele, e ele tudo fará.”

- **Salmo 37:5**

## RESUMO

O aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes das atividades agrícolas tem intensificado a preocupação com os impactos ambientais relacionados às mudanças climáticas, tornando necessário o desenvolvimento de estudos voltados à compreensão da dinâmica desses gases no sistema solo-atmosfera. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os fluxos de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) em diferentes sistemas agropecuários de produção no município de Rio Verde – GO, analisando a influência dos sistemas de manejo e da sazonalidade sobre as emissões. O estudo foi conduzido em cinco propriedades rurais representativas de diferentes usos do solo, incluindo áreas de mata, pastagem, agrofloresta, cana-de-açúcar, milho, soja, sorgo e pousio. As coletas foram realizadas ao longo das quatro estações do ano, utilizando câmara de fluxo de gases do solo (Smart Chamber) acoplada aos analisadores LI-COR 7810 e 7820. Simultaneamente, foram mensuradas variáveis ambientais, como temperatura e umidade do solo. Os resultados demonstraram que a sazonalidade exerceu forte influência sobre os fluxos de GEE, especialmente sobre o  $\text{CO}_2$ , que apresentou maiores emissões durante o verão ( $4,51 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) em função das elevadas temperaturas e da maior atividade microbiana. O  $\text{CH}_4$  apresentou predominância de valores negativos na maior parte das avaliações, indicando que os solos atuaram como drenos desse gás, principalmente em áreas de mata e agrofloresta. O  $\text{N}_2\text{O}$  apresentou maior variação entre os sistemas de uso do solo, com maiores emissões observadas em áreas cultivadas com milho ( $0,822 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), possivelmente devido à maior disponibilidade de nitrogênio proveniente das adubações nitrogenadas. De maneira geral, os sistemas com menor intensidade de manejo e maior cobertura vegetal apresentaram maior potencial de mitigação das emissões de gases de efeito estufa, enquanto sistemas agrícolas mais intensivos apresentaram maiores tendências de emissão. Assim, conclui-se que os fatores climáticos e o manejo do solo influenciam diretamente a dinâmica dos gases de efeito estufa, evidenciando a importância de práticas agrícolas sustentáveis, como sistemas agroflorestais, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e plantio direto, para a mitigação das emissões no setor agrícola.

**Palavras-chave:** gases do efeito estufa; fluxo de gases no solo; manejo do solo; sazonalidade; sistemas agroflorestais.

## ABSTRACT

The increase in greenhouse gas (GHG) emissions from agricultural activities has intensified concerns regarding the environmental impacts associated with climate change, highlighting the need for studies aimed at understanding the dynamics of these gases within the soil–atmosphere system. In this context, the present study aimed to evaluate the fluxes of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) in different agricultural production systems in the municipality of Rio Verde, Goiás, Brazil, analyzing the influence of management systems and seasonality on emissions. The study was conducted on five rural properties representing different land-use systems, including forest, pasture, agroforestry, sugarcane, corn, soybean, sorghum, and fallow areas. Sampling was carried out throughout the four seasons of the year using a soil gas flux chamber (Smart Chamber) coupled with LICOR 7810 and 7820 gas analyzers. Simultaneously, environmental variables such as soil temperature and soil moisture were measured. The results showed that seasonality strongly influenced GHG fluxes, particularly CO<sub>2</sub>, which presented the highest emissions during summer (4.51 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) due to higher temperatures and increased microbial activity. CH<sub>4</sub> showed a predominance of negative values in most evaluations, indicating that soils acted as sinks for this gas, especially in forest and agroforestry areas. N<sub>2</sub>O showed greater variation among land-use systems, with the highest emissions observed in corn-cultivated areas (0.822 nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), possibly due to the greater availability of nitrogen resulting from nitrogen fertilization. In general, systems with lower management intensity and greater vegetation cover showed greater potential for mitigating greenhouse gas emissions, whereas more intensive agricultural systems showed higher emission trends. Thus, it can be concluded that climatic factors and soil management directly influence greenhouse gas dynamics, highlighting the importance of sustainable agricultural practices, such as agroforestry systems, crop-livestock-forest integration (CLFI), and no-tillage systems, for mitigating emissions in the agricultural sector.

**Keywords:** greenhouse gases; soil gas fluxes; soil management; seasonality; agroforestry systems.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> Fluxo de gases do efeito estufa por estação do ano .....	7
<b>Figura 2:</b> Fluxo dos gases do efeito em diferentes sistemas de uso do solo no verão.....	9
<b>Figura 3:</b> Fluxo dos gases do efeito em diferentes sistemas de uso do solo no outono.....	11
<b>Figura 4:</b> Fluxo dos gases do efeito em diferentes sistemas de uso do solo no inverno.....	13
<b>Figura 5:</b> Fluxo dos gases do efeito em diferentes sistemas de uso do solo na primavera.....	15

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
3.1	Objetivo geral.....	3
3.2	Objetivos específicos.....	3
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
4.1	Local do experimento.....	4
4.2	Pontos amostrais.....	4
4.3	Mensuração do fluxo de gases no solo.....	4
4.4	Avaliação do fluxo de N <sub>2</sub> O.....	5
4.5	Análise Estatística.....	5
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>7</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>20</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>

## INTRODUÇÃO

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (GEE) apresentam evolução constante, atingindo níveis sem precedentes na última década (Dhakai et al., 2022). Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) destacam-se como os principais contribuintes, sendo responsáveis por mais de 90% do aquecimento climático provocado pelas atividades humanas (Montzka et al., 2011).

Apesar do CO<sub>2</sub> exercer maior influência pela quantidade emitida no aquecimento global, o CH<sub>4</sub> e o N<sub>2</sub>O apresentam maior potencial de aquecimento, sendo 28 e 265 vezes mais poluentes que o CO<sub>2</sub>, respectivamente. No Brasil o CO<sub>2</sub> é considerado o principal GEE emitido (IPCC, 2019; Eggleston et al., 2006).

A produção desses gases ocorre principalmente nas áreas de energia, agropecuária, processos industriais, resíduos e mudanças de uso da terra, considerando este último responsável por cerca de 45% das emissões de GEE no Brasil (SEEG, 2021). Diante deste cenário, as mudanças no uso da terra configuram-se como um dos principais fatores que impactam as emissões de GEE, visto que promovem alterações nas características físico-químicas e biológicas do solo (Moges et al., 2013; Kroeger et al., 2018).

Além disso, a intensidade das emissões está relacionada a fatores como temperatura, umidade, teores de carbono e nitrogênio e atividade microbiológica (Tavanti et al., 2020). A produção de GEE no solo resulta de uma interação complexa entre atividade microbiana, respiração radicular e processos químicos (Tang et al., 2019; Yang et al., 2022a).

Nesse sentido, o Brasil tem buscado estratégias para mitigação das emissões, como o Plano ABC+, que visa promover uma agricultura de baixa emissão de carbono por meio de práticas sustentáveis, como recuperação de pastagens, integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas agroflorestais, plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, florestas plantadas, tratamento de dejetos animais e adaptação às mudanças climáticas (Brasil, 2021).

Espera-se que as emissões resultantes da agricultura aumentem em função da crescente demanda por alimentos (Wiebe et al., 2019), trazendo a necessidade de estudos mais precisos sobre os fluxos de GEE no sistema solo-atmosfera.

## REVISÃO DE LITERATURA

As alterações no uso da terra promovem mudanças nas características físico-químicas e biológicas do solo, proporcionando condições adequadas à intensificação das emissões de GEE (Moges et al., 2013; Kroeger et al., 2018). Os fluxos de GEE do solo são regulados por

fatores abióticos e bióticos, incluindo a umidade do solo (Dang et al., 2023; Feng et al., 2022b), a temperatura (Akande et al., 2023), as propriedades do solo (Han & Zhu, 2020; Iqbal et al., 2023), os tipos de vegetação (Akande et al., 2023; Yang et al., 2022a), a biota do solo (Feng et al., 2022b; Han & Zhu, 2020) e perturbações antrópicas, principalmente as mudanças no uso e cobertura da terra (Tan et al., 2020).

O manejo da terra também interfere nas emissões de GEE, ao modificar a dinâmica de entrada e saída de carbono no ecossistema (Foley et al., 2005; Akande et al., 2023; Feng et al., 2022b). As florestas, que cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre, desempenham papel fundamental como sumidouros de carbono, absorvendo aproximadamente 30% das emissões globais de CO<sub>2</sub> (Bellassen e Luysaert, 2014).

No solo, as emissões de CO<sub>2</sub> estão associadas à respiração de raízes, microrganismos e à decomposição da matéria orgânica. As alterações no uso da terra influenciam essas emissões ao modificar a quantidade, qualidade e dinâmica das frações da matéria orgânica do solo (Yang et al., 2017).

Nesse contexto, a temperatura do solo é um fator fundamental na produção de CO<sub>2</sub>, pois regula a atividade microbiana e, conseqüentemente, a decomposição da matéria orgânica (Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2020).

No que se refere ao CH<sub>4</sub>, esse gás apresenta alto potencial de aquecimento global, com capacidade de absorção de radiação infravermelha 28 vezes superior à do CO<sub>2</sub> (IPCC, 2019). Sua produção ocorre em condições anaeróbias, mediada por microrganismos metanogênicos que fazem uso de compostos como acetato, hidrogênio, CO<sub>2</sub> e compostos metilados (Evans et al., 2019; Meyer et al., 2020), sendo beneficiada em temperaturas entre 37 °C e 45 °C (Vieira et al., 2008).

A produção de CH<sub>4</sub> está relacionada à decomposição da matéria orgânica em ambientes alagados, como em sistemas de cultivo de arroz (Silva et al., 2011; Liu et al., 2021), sendo também observada em solos saturados devido à alta precipitação (Kroeger et al., 2021). Além disso, a compactação do solo pode reduzir a macroporosidade e a difusão de oxigênio, favorecendo a formação de condições anaeróbias que estimulam a atividade de microrganismos metanogênicos e aumentam a produção de CH<sub>4</sub>, ao mesmo tempo em que reduzem sua oxidação por bactérias metanotróficas (Hamza; Anderson, 2005).

A oxidação do CH<sub>4</sub> acontece em condições aeróbias por microrganismos metanotróficos, convertendo-o em CO<sub>2</sub> (Chang et al., 2021). Mudanças no uso da terra podem minimizar as emissões de CH<sub>4</sub> devido à diminuição da umidade e dos estoques de carbono do solo (Ondiek et al., 2021; Wachiye et al., 2021).

Em relação ao  $N_2O$ , sua produção no solo é dependente da ação de bactérias, fungos e arqueias que usam compostos nitrogenados como substrato (Merloti et al., 2019). As arqueias produzem menores quantidades de  $N_2O$  em comparação às bactérias (Prosser et al., 2020), enquanto os fungos realizam desnitrificação sem produção de  $N_2$  (Maeda et al., 2015).

A fertilização nitrogenada intensifica a disponibilidade de nitrato no solo, aumentando as emissões de  $N_2O$  (Gelfand et al., 2015; Cardoso et al., 2017), com picos ocorrendo poucos dias após a aplicação de fertilizantes (Zurovec et al., 2021). As áreas agrícolas com fertilização nitrogenada estão propensas a maiores emissões de  $N_2O$  (IPCC, 2007; Bell et al., 2015), uma vez que a ureia é uma das fontes que mais contribuem para essas emissões (Vieira, 2017).

Adicionalmente, o uso de resíduos animais pode intensificar essas emissões (Pu et al., 2019). A textura do solo também interfere nesse processo, sendo solos argilosos mais suscetíveis à formação de condições anaeróbias favoráveis à produção de  $N_2O$  (Carmo et al., 2005; Pihlatie et al., 2004).

Mudanças no uso da terra, como a conversão de florestas em áreas agrícolas ou pastagens, beneficiam a emissão de  $N_2O$  devido a alterações microbiológicas que estimulam processos de nitrificação e desnitrificação, enquanto áreas florestais podem atuar como sumidouros desse gás (Merloti et al., 2019).

Diante desse contexto, a crescente concentração de GEE na atmosfera, tem impulsionado a busca por métodos mais precisos para estimativa dos fluxos no sistema solo-atmosfera.

A utilização de câmaras para medição dos gases apresenta alta sensibilidade e precisão, permitindo considerar fatores como temperatura do ar e do solo, umidade do solo e radiação solar (Reicosky & Lindstrom, 1993; Jensen et al., 1996; La Scala et al., 2000; La Scala et al., 2001).

## **OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar os fluxos de gases do efeito estufa ( $CH_4$ ,  $CO_2$  e  $N_2O$ ) do solo sob diferentes coberturas, relacionando a influência dos sistemas de manejo e as estações do ano sobre as emissões.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Quantificar as emissões de  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2O$  em áreas agrícolas representativas das regiões estudadas.

- Comparar o efeito dos diferentes sistemas de cultivo e estações do ano sobre a emissão de GEE.
- Identificar possíveis fatores que influenciam a variação das emissões nos sistemas analisados.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Local do experimento**

O estudo foi instalado em 5 fazendas localizadas no município de Rio Verde - GO (Fazenda do IF Goiano, Fazenda São Francisco, Fazenda Mata do Lobo, Fazenda Reunidas e Usina Decal). O clima predominante no estado de Goiás, segundo a classificação de Köppen é do tipo Tropical Úmido ou Megatérmico (Aw), do subtipo Tropical de Savana, com verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média anual gira em torno de 25 °C, enquanto a precipitação média anual é de aproximadamente 1.785 mm, sendo que a maior parte (cerca de 87%) ocorre entre outubro e março. A região costuma apresentar um período de estiagem que dura, em média, quatro meses (ALVARES et al., 2014).

### **4.2 Pontos amostrais**

As cinco fazendas foram acompanhadas por meio da avaliação de 40 pontos amostrais cada, totalizando 200 pontos. As coletas foram realizadas ao longo das quatro estações do ano, resultando inicialmente em 800 pontos amostrais ao final do período experimental. Entretanto, ocorreram perdas amostrais durante a condução do experimento, decorrentes de fatores como passagem de máquinas agrícolas sobre os pontos, danos causados durante a colheita e remoção dos anéis por pessoas ou animais. Em função dessas perdas, 56 pontos foram desconsiderados, totalizando 744 pontos amostrais efetivamente avaliados.

### **4.4 Mensuração do fluxo de gases no solo**

Os gases monitorados foram CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O sendo as amostragens realizadas por meio de uma câmara de fluxo de gases no solo (Smart Chamber), acoplada aos analisadores de gases LI-COR 7820 e LI-COR 7810.

As coletas foram realizadas ao longo das quatro estações do ano, compreendendo: outono (20 de março a 20 junho de 2025), inverno (20 de junho a 22 de setembro de 2025), primavera (22 de setembro a 21 de dezembro de 2025), verão (21 de dezembro de 2025 a 20 de março de 2026)

Inicialmente foram instalados anéis de PVC a aproximadamente 5 cm acima da superfície do solo, cerca de 24 horas antes da coleta, a fim de evitar interferências nos resultados decorrentes da perturbação do solo no momento da instalação.

Posteriormente a instalação dos anéis foi realizado a coleta dos gases por meio de câmara de fluxo de gases (Smart Chamber) sendo acoplada ao anel.

O sistema foi conectado, por meio de cabos de aproximadamente 2 m de comprimento, a analisadores de gases, responsáveis pela quantificação das concentrações de dióxido de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Os dados obtidos foram processados automaticamente em campo pelo sistema integrado à câmara, permitindo o cálculo direto dos fluxos de gases.

Durante as coletas, também foram mensuradas a temperatura e a umidade do solo por meio de sondas e sensores acoplados ao sistema, permitindo a avaliação da influência dessas variáveis nos fluxos de gases.

Em cada ponto amostral, foram realizadas três repetições das medições com objetivo de aumentar a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos, sendo que cada repetição teve duração média de aproximadamente 3 minutos, totalizando cerca de 10 minutos por ponto de coleta.

As medições foram realizadas no período da manhã, entre 07h00 e 12h00, intervalo considerado mais adequado por apresentar menor variação térmica do solo, reduzindo interferências nos fluxos de gases. As coletas não foram realizadas sob condições de chuva, uma vez que o equipamento é sensível à umidade, podendo comprometer a precisão das medições.

#### **4.4 Avaliação do fluxo de N<sub>2</sub>O**

As avaliações dos fluxos de N<sub>2</sub>O não foram realizadas inicialmente durante a estação do outono e inverno, correspondendo ao período seco da região pois os resultados obtidos apresentaram valores insignificantes sendo muito baixos e próximos de zero na maioria dos sistemas avaliados, indicando baixa contribuição desse gás para as emissões observadas no período.

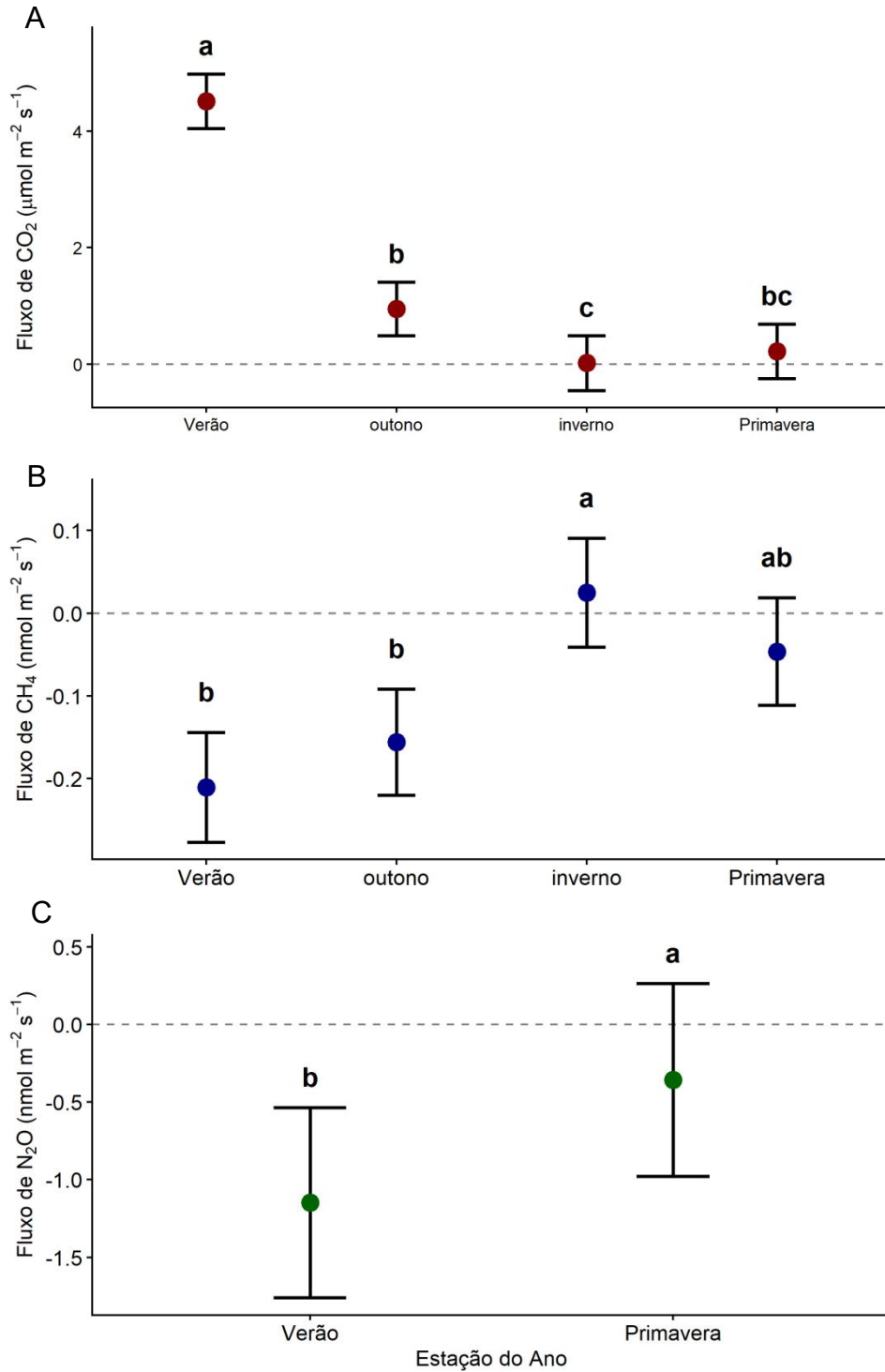
#### **4.5 Análise Estatística**

Os dados obtidos em campo foram analisados no software SoilFluxPro™ (LI-COR Biosciences), utilizado para processamento, controle de qualidade e cálculo dos fluxos de gases de efeito estufa provenientes do solo. Posteriormente os dados foram processados e analisados no ambiente computacional R (v. 4.x.x; R Core Team). Inicialmente, foi realizada

uma etapa de controle de qualidade e filtragem dos dados de fluxos gasosos baseada nos diagnósticos dos analisadores. Observações de fluxos de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) associadas a valores distintos de zero no diagnóstico do equipamento (variável DIAG\_7810) foram desconsideradas e atribuídas como dados ausentes (NA). Procedimento idêntico foi aplicado aos fluxos de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) utilizando o respectivo diagnóstico do sensor (DIAG\_7820). Adicionalmente, foi realizada uma filtragem com base no coeficiente de variação (CV); valores de fluxo cujo CV ou CV linear ultrapassaram 50% foram removidos da análise. Após o controle de qualidade, os dados foram agregados por ponto de amostragem e data, calculando-se as médias diárias para as variáveis numéricas. Antes da modelagem, avaliou-se a colinearidade entre as covariáveis ambientais contínuas por meio do teste de correlação de Pearson entre a condutividade elétrica inicial (EC\_initial) e o conteúdo de água no solo inicial (SWC\_initial). Para investigar o efeito dos fatores de manejo e sazonais sobre os fluxos de gases de efeito estufa ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ), foram ajustados Modelos Lineares Mistos (GLMM/LMM) utilizando o pacote lme4. A análise foi conduzida em duas abordagens complementares: Efeito Sazonal Global: Avaliou-se o efeito geral das estações do ano sobre os fluxos gasosos. O modelo incluiu a 'Estação' (fator com quatro níveis: Verão, Outono, Inverno e Primavera), o conteúdo de água no solo (SWC\_initial) e a temperatura do solo (TS\_2\_initial) como efeitos fixos. A estrutura de amostragem foi incorporada como efeito aleatório aninhado (1 | Fazenda / Ponto) para controlar a pseudorreplicação espacial e a dependência temporal das medidas repetidas. Efeito do Tipo de Cultura por Estação: Para isolar o efeito do manejo vegetal, a base de dados foi estratificada por estação do ano. Culturas com baixa representatividade (frequência menor que 10 observações) foram removidas e categorias semelhantes foram agrupadas (ex.: "milho" e "milho\_pasto" colapsados em "milho"; "girassol" e "girassol\_pasto" em "girassol"). Para cada estação separadamente, ajustou-se um modelo misto contendo 'Cultura', SWC\_initial e TS\_2\_initial como efeitos fixos, e 'Fazenda' como efeito aleatório (1 | Fazenda). O pressuposto de multicolinearidade nos modelos foi verificado por meio do Fator de Inflação da Variância (VIF) utilizando o pacote car. A significância dos efeitos fixos foi testada por meio da Análise de Variância do Tipo III (Wald type-III chi-square tests) através da função Anova do pacote car. Quando detectados efeitos significativos ( $p < 0,05$ ), as médias marginais estimadas (EMMeans) foram calculadas e comparadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey ( $=0,05$ ), com a aplicação do algoritmo de agrupamento por letras compactas (CLD) para síntese gráfica.

## RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstraram diferenças nos fluxos de gases de efeito estufa entre as estações do ano e os diferentes sistemas de uso do solo avaliados. A Figura 1 apresenta o comportamento geral dos fluxos de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em função da sazonalidade.



**Figura 1.** Fluxo de gases do efeito estufa do solo ((A) Fluxo de CO<sub>2</sub>; (B) Fluxo de CH<sub>4</sub> e (C) Fluxo de N<sub>2</sub>O) em cada estação do ano em diferentes sistemas de produção. Médias seguidas

pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

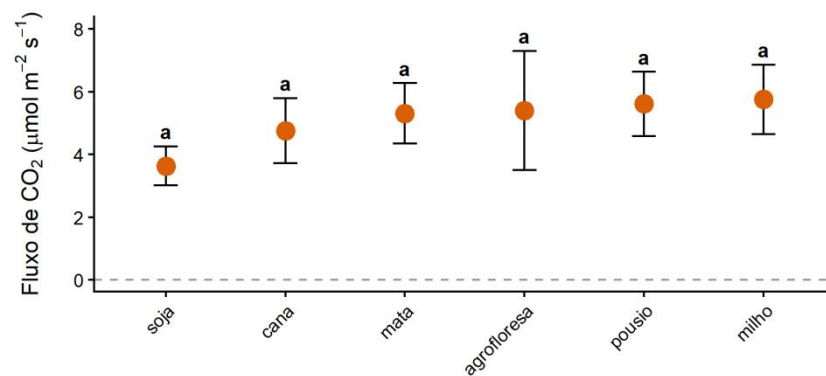
Os resultados mostram que o fluxo dos gases de efeito estufa responderam de maneira distinta para cada estação do ano. Para o CO<sub>2</sub>, o verão apresentou a maior média de emissão (4,51  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), diferindo estatisticamente das demais estações enquanto o inverno apresentou os menores valores (0,023  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Esse comportamento indica forte influência das condições climáticas sobre a respiração do solo, uma vez que temperaturas mais elevadas e maior atividade microbiana no verão estimulam a decomposição da matéria orgânica e aumentam a liberação de CO<sub>2</sub>.

Observa-se que o fluxo de CH<sub>4</sub> teve as maiores emissões ocorrendo no inverno, diferindo estatisticamente do verão e do outono. A maior emissão de CH<sub>4</sub> no inverno pode estar associada à formação de condições anaeróbias, favorecendo a atividade de microrganismos metanogênicos. Em contraste, verão, outono e primavera apresentaram valores negativos indicando o sequestro desse gás pelo solo, sugerindo maior oxigenação do ambiente e consequente redução da metanogênese.

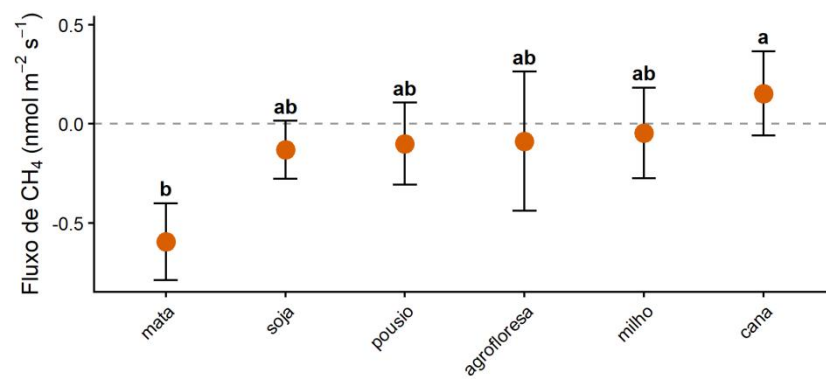
No caso do N<sub>2</sub>O, a primavera apresentou maior estoque em comparação ao verão, diferindo estatisticamente pelo teste de Tukey.

Verão

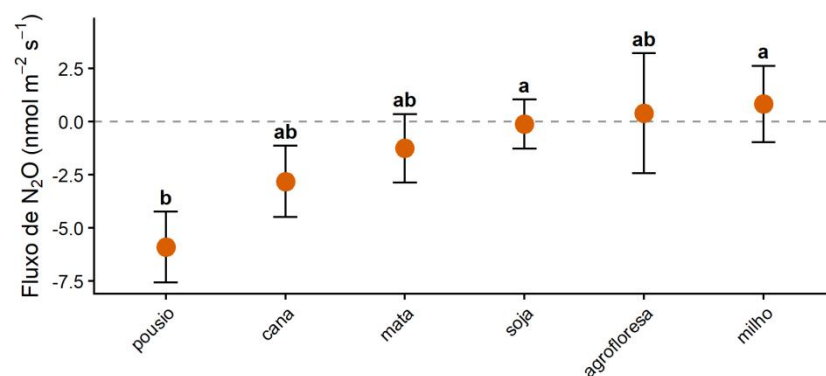
A



B



C



**Figura 2.** Fluxo dos gases do efeito do solo ((A) Fluxo de CO<sub>2</sub>; (B) Fluxo de CH<sub>4</sub> e (C) Fluxo de N<sub>2</sub>O) em diferentes sistemas de produção no verão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados observados para o período de verão demonstraram diferenças importantes entre os sistemas de uso do solo quanto às emissões de gases de efeito estufa. Para o CO<sub>2</sub>, não

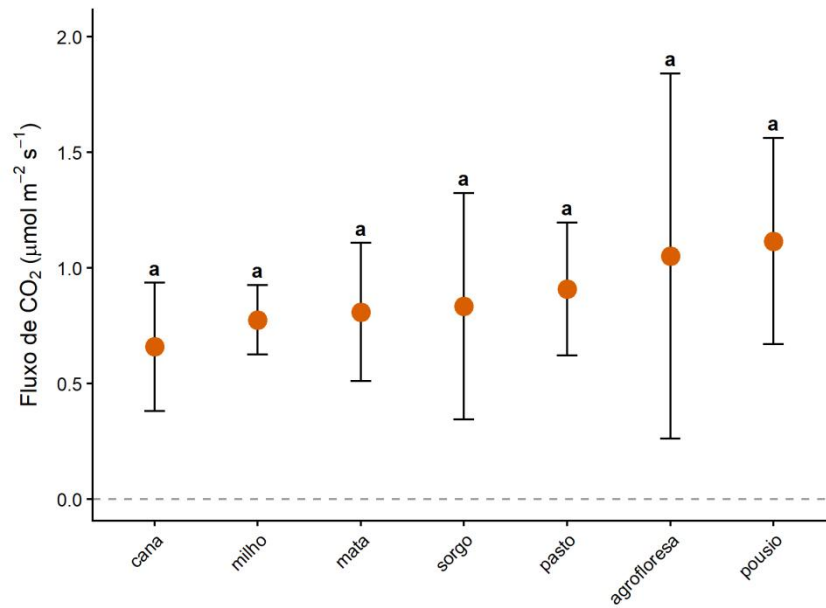
foram observadas diferenças significativas entre os sistemas, uma vez que todas permaneceram no mesmo grupo estatístico pelo teste de Tukey. Apesar da ausência de diferença estatística entre os sistemas, a temperatura do solo exerceu efeito significativo sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> ( $p = 0,0060$ ), indicando que o aumento da temperatura favoreceu a respiração microbiana e a decomposição da matéria orgânica, intensificando as emissões desse gás durante o verão.

Para o fluxo de CH<sub>4</sub>, houve efeito significativo das culturas avaliadas ( $p = 0,0307$ ). A cultura da cana apresentou a maior média de emissão ( $0,1534 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), diferindo estatisticamente da mata, que teve o maior sequestro ( $-0,5940 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Os valores negativos observados na mata indicam maior potencial de sequestro de CH<sub>4</sub> pelo solo, possivelmente em função da maior estabilidade ambiental, maior aeração e elevada atividade de microrganismos metanotróficos. Já a maior emissão observada na cana pode estar associada ao maior acúmulo de resíduos orgânicos e à maior retenção de umidade no solo, criando condições favoráveis à produção de metano.

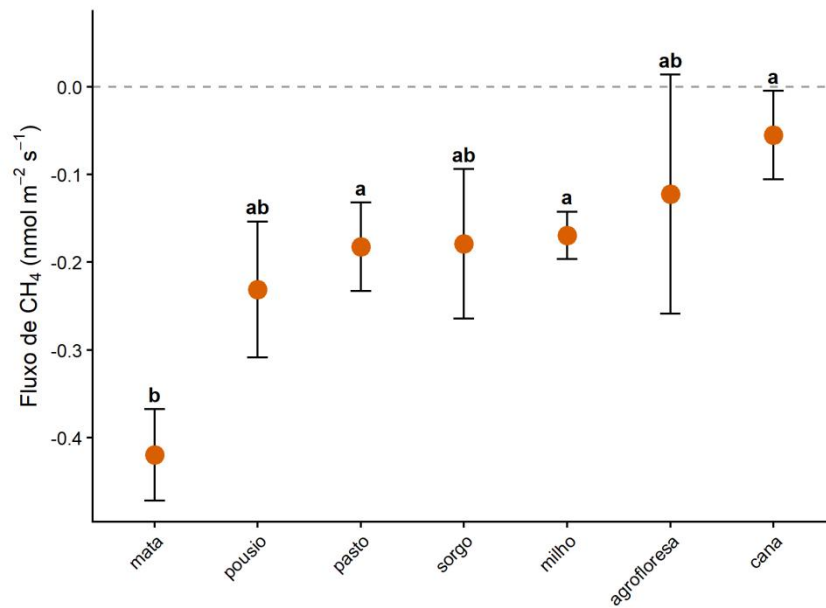
No caso do N<sub>2</sub>O, houve efeito significativo das culturas ( $p = 0,0033$ ), evidenciando influência direta do sistema de uso do solo sobre as emissões. O milho apresentou a maior média de emissão ( $0,822 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), enquanto o pousio apresentou o menor valor ( $-5,912 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), diferindo estatisticamente entre si. Os valores negativos observados no pousio indicam consumo de N<sub>2</sub>O pelo solo ou baixa atividade dos processos de nitrificação e desnitrificação. Em contrapartida, o maior fluxo observado no milho pode estar relacionado à maior disponibilidade de nitrogênio no sistema por conta das adubações nitrogenadas realizadas na cultura, favorecendo a atividade microbiana responsável pela produção de N<sub>2</sub>O. Além disso, sistemas agrícolas mais intensivos tendem a apresentar maior ciclagem de nutrientes e maior emissão desse gás.

Outono

A



B



**Figura 3.** Fluxo dos gases do efeito do solo ((A) Fluxo de CO<sub>2</sub> e (B) Fluxo de CH<sub>4</sub>) em diferentes sistemas de produção no verão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

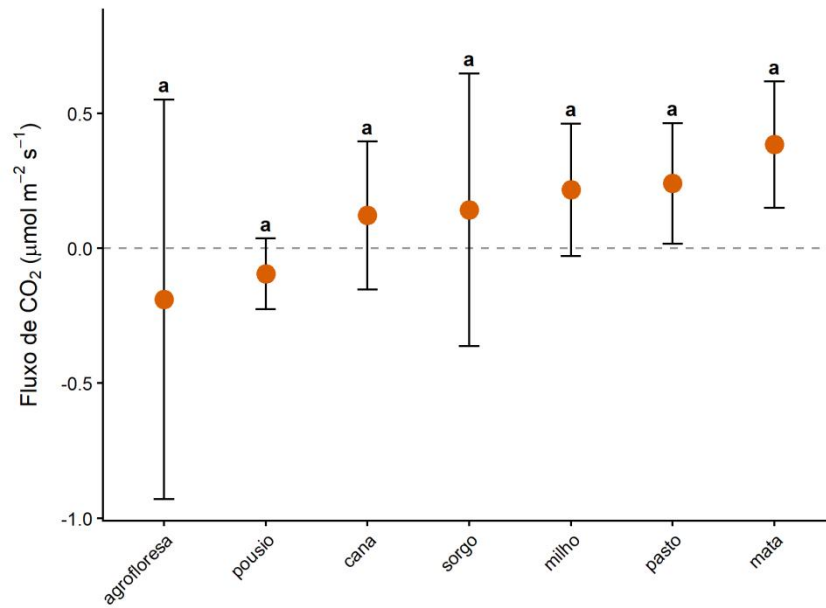
Os resultados obtidos para o período de outono demonstraram diferenças expressivas principalmente para o fluxo de CH<sub>4</sub>, indicando forte influência dos sistemas de uso do solo sobre a dinâmica desse gás. Houve efeito altamente significativo das culturas avaliadas ( $p < 0,001$ ). Todos os sistemas apresentaram valores negativos de fluxo, caracterizando o solo como dreno de CH<sub>4</sub> durante o período avaliado. Entretanto, a mata apresentou o menor valor ( $-0,4197 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), diferindo estatisticamente da cana ( $-0,0553 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), o que evidencia maior capacidade de consumo de metano nesse ambiente.

O maior sequestro de CH<sub>4</sub> observado na mata pode estar relacionado à maior estabilidade estrutural do solo, maior teor de matéria orgânica e maior atividade de microrganismos metanotróficos, responsáveis pela oxidação do metano atmosférico. Além disso, ambientes naturais tendem a apresentar melhores condições de aeração e menor perturbação física do solo, favorecendo o consumo desse gás. Em contrapartida, a cana apresentou menor capacidade de sequestro, possivelmente devido às alterações promovidas pelo manejo agrícola, como maior compactação e mudanças na dinâmica de umidade e matéria orgânica do solo.

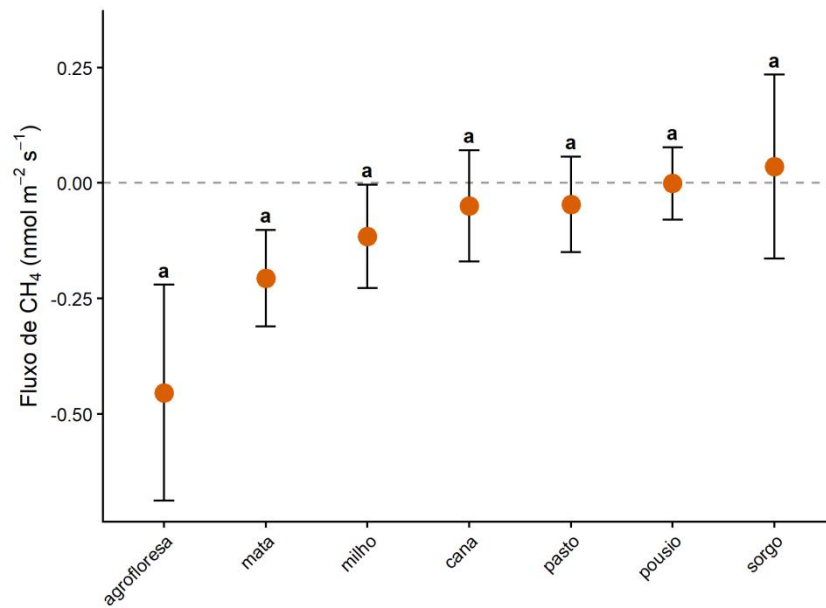
Os sistemas de milho ( $-0,1694 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), pasto ( $-0,1825 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), sorgo ( $-0,1790 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), pousio ( $-0,2310 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e agrofloresta ( $-0,1226 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) apresentaram comportamento intermediário, indicando ausência de diferenças consistentes entre esses sistemas. Para o CO<sub>2</sub>, não houve efeito significativo das culturas avaliadas ( $p = 0,9708$ ).

Inverno

A



B



**Figura 4.** Fluxo dos gases do efeito do solo ((A) Fluxo de CO<sub>2</sub> e (B) Fluxo de CH<sub>4</sub>) em diferentes sistemas de produção no verão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

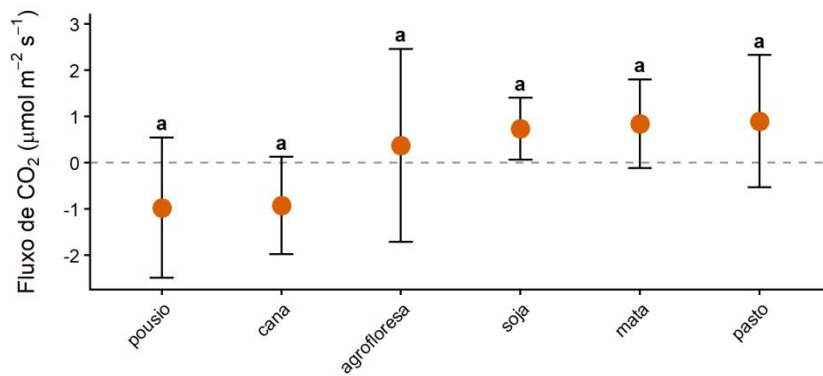
Para o fluxo de CH<sub>4</sub>, não houve efeito significativo das culturas ( $p = 0,1374$ ), indicando comportamento semelhante entre os diferentes sistemas. Todos os tratamentos permaneceram no mesmo grupo estatístico pelo teste de Tukey. Apesar disso, observa-se tendência de maior consumo de CH<sub>4</sub> na agrofloresta ( $-0,4541 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e na mata ( $-0,2062 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), enquanto o sorgo apresentou a maior média ( $0,0355 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), sendo o único sistema com valor positivo no fluxo.

Os valores negativos observados na maioria dos sistemas indicam predominância do consumo de CH<sub>4</sub> pelo solo durante o inverno, caracterizando os ambientes como drenos desse gás. A agrofloresta apresentou o maior potencial de sequestro, possivelmente devido à maior diversidade vegetal, maior aporte de matéria orgânica e melhores condições físicas do solo, fatores que favorecem maior atividade biológica e maior estabilidade ambiental.

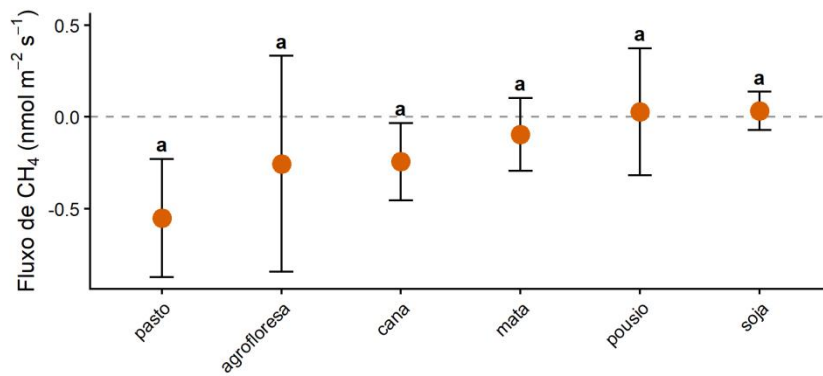
Para o CO<sub>2</sub>, não foram observadas diferenças significativas entre as culturas ( $p = 0,4459$ ). Todos os sistemas permaneceram no mesmo grupo estatístico pelo teste de Tukey, indicando comportamento relativamente homogêneo das emissões durante o inverno. Apesar disso, a mata apresentou a maior média de emissão ( $0,3842 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), enquanto a agrofloresta apresentou os menores valores ( $-0,1895 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Primavera

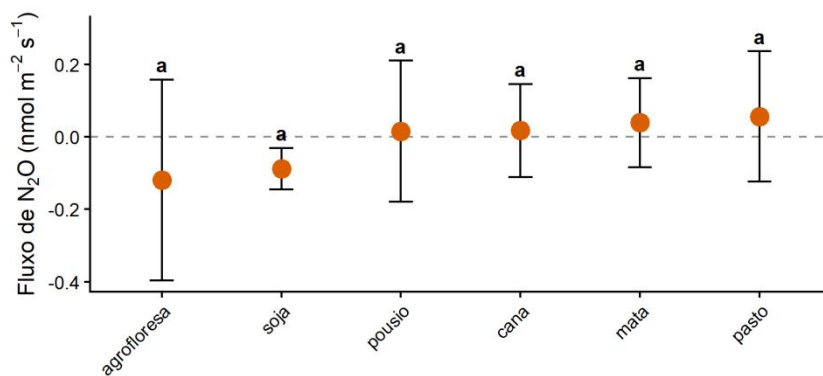
A



B



C



**Figura 5.** Fluxo dos gases do efeito do solo ((A) Fluxo de CO<sub>2</sub>; (B) Fluxo de CH<sub>4</sub> e (C) Fluxo de N<sub>2</sub>O) em diferentes sistemas de produção no verão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos para o período de primavera demonstraram menor influência dos sistemas de uso do solo sobre os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>

Para o CO<sub>2</sub>, não houve efeito significativo das culturas avaliadas ( $p = 0,4464$ ), uma vez que todos os tratamentos permaneceram no mesmo grupo estatístico. Entretanto, a umidade do solo apresentou efeito significativo ( $p = 0,0487$ ), indicando influência direta da disponibilidade hídrica sobre os fluxos de CO<sub>2</sub> durante a primavera. O pasto apresentou a maior média de emissão ( $0,897$ ), seguido da mata ( $0,842 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e da soja ( $0,734 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), enquanto o pousio apresentou os menores valores ( $-0,972 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ).

Para o fluxo de CH<sub>4</sub>, não houve efeito significativo das culturas ( $p = 0,3859$ ), assim como da umidade e da temperatura do solo. Todos os sistemas permaneceram no mesmo grupo estatístico pelo teste de Tukey, indicando comportamento semelhante entre as áreas avaliadas. Apesar disso, observa-se tendência de maior emissão de CH<sub>4</sub> na soja ( $0,0322 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e no pousio ( $0,0277 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), enquanto o pasto apresentou o menor valor ( $-0,5511 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), indicando maior potencial de consumo desse gás. Os valores negativos observados em sistemas como pasto, agrofloresta ( $-0,2561 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e cana ( $-0,2438 \mu\text{nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) sugerem predominância do sequestro de CH<sub>4</sub> pelo solo durante a primavera.

Para o N<sub>2</sub>O não houve diferenças estatísticas significativas entre os sistemas de produção avaliados ( $p = 0,8411$ ). As médias estimadas situaram-se próximas de zero em todas as coberturas. O sistema de pastagem registou a maior emissão numérica ( $0,0557 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), seguido pela mata nativa ( $0,0392 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), cana-de-açúcar ( $0,0171 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e pousio ( $0,0151 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Em contrapartida, os sistemas de monocultura de soja e agrofloresta atuaram como sumidouros temporários deste gás, apresentando fluxos negativos de ( $-0,0882 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) para a soja e ( $-0,1194 \text{ nmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) para a agrofloresta. Não houve efeito significativo para umidade inicial do solo ( $p = 0,4327$ ) e para a temperatura do solo ( $p = 0,4531$ ) sobre os fluxos de N<sub>2</sub>O nesta estação.

## DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a sazonalidade exerceu forte influência sobre os fluxos de gases de efeito estufa, evidenciando que alterações nas condições climáticas afetam diretamente os processos microbiológicos responsáveis pela emissão e sequestro de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O (WANG et al., 2022). De maneira geral, observou-se maior emissão de CO<sub>2</sub> durante o verão, enquanto o CH<sub>4</sub> apresentou predominância de valores negativos na maior parte das estações, indicando comportamento de consumo desse gás pelo solo. Já o N<sub>2</sub>O apresentou maior variação entre as estações.

A influência significativa da temperatura e da umidade do solo demonstra que esses fatores atuam como importantes controladores das emissões gasosas. Solos com maior disponibilidade hídrica e temperaturas elevadas favorecem a atividade microbiana e aceleram processos como respiração do solo, nitrificação, desnitrificação e metanogênese. Em contrapartida, ambientes mais aerados e com menor umidade tendem a favorecer a oxidação do CH<sub>4</sub>, promovendo o consumo desse gás pelos microrganismos metanotróficos (BASHEER et al., 2024). Além disso, os resultados evidenciam que sistemas com maior cobertura vegetal e menor intensidade de manejo, como mata e agrofloresta, apresentaram maior potencial de mitigação das emissões, principalmente para CH<sub>4</sub>, enquanto sistemas agrícolas com maior intensidade de manejo, especialmente milho e cana, apresentaram maiores tendências de emissão, principalmente para CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O.

Durante o verão, observou-se maior intensidade nos fluxos dos gases avaliados, indicando forte influência das condições climáticas típicas desse período. As emissões de CO<sub>2</sub> podem ser explicadas pelas elevadas temperaturas e maior disponibilidade de água no solo, fatores que estimulam a atividade microbiana, a decomposição da matéria orgânica e a respiração radicular das culturas. Além disso, temperaturas mais altas favorecem a difusão do CO<sub>2</sub> no solo, intensificando sua liberação para a atmosfera (CAREY et al., 2016; VOIGT et al., 2017). As mudanças no uso da terra também podem influenciar a temperatura do solo, sendo este um fator limitante para a produção de CO<sub>2</sub>, uma vez que interfere diretamente na atividade microbiana do solo (ZHANG et al., 2018; ZHANG et al., 2020).

Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas significativas entre as culturas para CO<sub>2</sub>, sistemas como milho e pousio apresentaram maiores médias de emissão, sugerindo maior atividade biológica e maior decomposição de resíduos vegetais nesses ambientes. No caso do milho, essa tendência pode estar relacionada ao maior aporte de resíduos culturais ao solo, uma vez que essa cultura produz maior quantidade de biomassa quando comparada à soja, fornecendo mais substrato para a atividade microbiana e para os processos de decomposição da matéria orgânica. Mazzilli et al. (2014) observaram que os aportes de carbono provenientes dos resíduos do milho foram superiores aos da soja, resultando em maior ciclagem e decomposição do carbono no solo. Em contrapartida, a soja apresentou menores valores de emissão, possivelmente em função das características do manejo e da dinâmica dos resíduos culturais. Para o CH<sub>4</sub>, a cana apresentou os maiores fluxos de emissão, enquanto a mata apresentou os menores valores, caracterizando maior potencial de consumo desse gás. Esse comportamento demonstra que sistemas naturais ou menos perturbados tendem a favorecer condições mais adequadas para a atividade de microrganismos

metanotróficos, responsáveis pela oxidação do metano atmosférico. Em geral, ecossistemas florestais atuam como absorvedores de  $\text{CH}_4$ , resultado frequentemente observado em estudos relacionados à dinâmica e ao transporte desse gás em diferentes habitats (LUO et al., 2012)

No solo, a produção de  $\text{CH}_4$  está ligada à metanogênese, processo realizado por microrganismos em ambientes sem oxigênio e sem aceptores de elétrons mais eficientes, como nitratos e sulfatos (DIAS, 2013).

O  $\text{N}_2\text{O}$  apresentou diferenças significativas entre os sistemas avaliados, com destaque para o milho, que apresentou os maiores fluxos. Esse resultado pode estar relacionado à maior disponibilidade de nitrogênio mineral no sistema, favorecendo os processos de nitrificação e desnitrificação, principais responsáveis pela produção de  $\text{N}_2\text{O}$ . As variações na umidade do solo também influenciam essas emissões, uma vez que condições de secagem estimulam a nitrificação, enquanto a umidificação do solo favorece a desnitrificação, intensificando a liberação desse gás (OLDFIELD et al., 2021). Em contraste, o pousio apresentou os menores valores, indicando menor atividade microbiana relacionada ao ciclo do nitrogênio. A concentração de matéria orgânica presente no solo também pode influenciar na produção de  $\text{N}_2\text{O}$ , uma vez que maiores teores atuam como tamponantes do pH, reduzindo a concentração de  $\text{NH}_4^+$  na solução do solo e, conseqüentemente, as concentrações subseqüentes de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x^-$  e  $\text{N}_2\text{O}$  (BREUILLIN-SESSOMS et al., 2017).

No outono, os resultados demonstraram predominância de valores negativos para  $\text{CH}_4$  em todos os sistemas avaliados, indicando que os solos atuaram como drenos de metano atmosférico nesse período. A mata apresentou os maiores valores negativos, evidenciando maior potencial de consumo desse gás. Esse comportamento pode estar relacionado à maior estabilidade estrutural do solo, ao maior teor de matéria orgânica e às melhores condições físicas e biológicas observadas em ambientes naturais. Além disso, fatores ambientais, como precipitação, radiação e temperatura, associados às características do solo, como teor de água, pH, capacidade de redução e níveis de matéria orgânica, influenciam diretamente a dinâmica do  $\text{CH}_4$ , pois podem modificar a liberação de exsudatos pelas plantas e afetar a atividade microbiana no solo (AGOSTINETTO et al., 2002).

Para o  $\text{CO}_2$ , não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas avaliados, indicando comportamento relativamente homogêneo da respiração do solo durante o outono. Apesar disso, o pousio apresentou maiores médias de emissão, possivelmente devido à decomposição de resíduos vegetais acumulados na superfície do solo.

Durante o inverno, observou-se menor variação entre os sistemas de uso do solo. Para o  $\text{CH}_4$ , apesar da ausência de diferenças estatísticas significativas entre as culturas, a

agrofloresta e a mata apresentaram maiores tendências de consumo desse gás, enquanto o sorgo apresentou os maiores valores de emissão. A umidade do solo foi o principal fator controlador dos fluxos de  $\text{CH}_4$  durante o inverno, demonstrando que pequenas alterações na disponibilidade hídrica podem modificar significativamente os processos microbiológicos relacionados à produção e ao consumo de metano. Segundo Glatzel e Stahr (2001), a emissão de  $\text{CH}_4$  no solo não depende necessariamente de condições totalmente anaeróbias, como observado em áreas alagadas, pois pequenos sítios anaeróbios presentes entre os agregados do solo já podem favorecer a produção e a emissão desse gás. Em regiões tropicais, a alta incidência de chuvas pode favorecer a compactação do solo e, com isso, criar condições de anaerobiose, ambiente ideal para a produção de metano (GOMES, 2006).

A predominância de valores negativos indica que os solos continuaram atuando como drenos de  $\text{CH}_4$  mesmo em condições de menor temperatura. Para o  $\text{CO}_2$ , não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas avaliados, sugerindo redução da atividade microbiana e da respiração do solo em função das temperaturas mais amenas. Os menores fluxos observados no inverno refletem a redução do metabolismo microbiano e da decomposição da matéria orgânica nesse período. De forma geral, os resultados do inverno evidenciam maior estabilidade dos fluxos gasosos e reforçam a importância das condições climáticas no controle das emissões de gases de efeito estufa.

Na primavera, observou-se comportamento intermediário entre as condições do inverno e do verão, caracterizado principalmente pela influência da umidade do solo sobre os fluxos de  $\text{CO}_2$ . O aumento gradual da disponibilidade hídrica favoreceu a retomada da atividade microbiana e intensificou a respiração do solo.

Embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre as culturas para  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , alguns sistemas apresentaram tendências distintas. O pasto apresentou maior potencial de consumo de  $\text{CH}_4$ , enquanto soja e pousio apresentaram leves tendências de emissão. Já para  $\text{CO}_2$ , o pasto e a mata apresentaram maiores médias de emissão, possivelmente em função da maior atividade biológica do solo. Em sistemas de pastagem mal manejadas, a entrada de carbono no solo é reduzida principalmente pela baixa eficiência das gramíneas em produzir raízes e palhada. Essa menor entrada de carbono no solo não consegue compensar as emissões naturais desse sistema de uso da terra (TAVANTI et al., 2020).

O  $\text{N}_2\text{O}$  não apresentou diferenças estatísticas significativas entre os sistemas de uso do solo durante a primavera, indicando comportamento semelhante entre as áreas avaliadas. As médias observadas permaneceram próximas de zero, evidenciando baixa variação nos fluxos desse gás durante o período. Apesar da ausência de diferença estatística, o sistema de

pastagem apresentou a maior emissão numérica, enquanto os sistemas de soja e agrofloresta apresentaram valores negativos, caracterizando comportamento de consumo temporário de  $N_2O$  pelo solo. Esse comportamento pode estar relacionado às diferenças na disponibilidade de nitrogênio mineral, na umidade do solo e na atividade microbiológica entre os sistemas avaliados (MCSWINEY; ROBERTSON, 2005).

## CONCLUSÃO

Os fluxos de gases de efeito estufa foram influenciados tanto pela sazonalidade quanto pelos diferentes sistemas de uso do solo avaliados. As condições climáticas, principalmente temperatura e umidade do solo, exerceram papel fundamental na dinâmica das emissões de  $CO_2$ ,  $CH_4$  e  $N_2O$ .

De maneira geral, o  $CO_2$  apresentou maiores emissões durante o verão, período caracterizado por temperaturas mais elevadas e maior disponibilidade hídrica. Entre os sistemas avaliados, milho e pousio apresentaram maiores tendências de emissão, enquanto a soja apresentou os menores valores. Os sistemas de mata, pastagem, agrofloresta, cana-de-açúcar e sorgo apresentaram comportamento intermediário para esse gás.

Para o  $CH_4$ , observou-se predominância de valores negativos na maior parte das avaliações, indicando que os solos atuaram como drenos desse gás. Os maiores potenciais de sequestro foram observados nos sistemas de mata nativa e agrofloresta, enquanto cana-de-açúcar, milho, soja, sorgo, pastagem e pousio apresentaram comportamento intermediário, variando conforme a estação do ano e as condições ambientais.

O  $N_2O$  apresentou maior variação entre os sistemas produtivos. As maiores emissões foram observadas principalmente nas áreas cultivadas com milho, possivelmente em função da maior disponibilidade de nitrogênio proveniente das adubações nitrogenadas. Em contrapartida, sistemas como soja, agrofloresta, cana-de-açúcar, pastagem, mata nativa e pousio apresentaram menores emissões e valores próximos de zero na maior parte das avaliações.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M. A.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. *Ciência Rural*, v. 32, n. 6, p. 1073-1081, 2002.
- AKANDE, O. J. et al. Meta-analysis shows that forest soil CO<sub>2</sub> fluxes depend on disturbance regime and biome type. *Ecology Letters*, v. 26, n. 5, p. 765-777, 2023.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2014.
- BASHEER, S. et al. A review of greenhouse gas emissions from agricultural soil. *Sustainability*, v. 16, n. 11, p. 4789, 2024.
- BELL, M. J. et al. Nitrous oxide emissions from fertilised UK arable soils: fluxes, emission factors and mitigation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 212, p. 134-147, 2015.
- BELLASSEN, V.; LUYSSAERT, S. Managing forests in uncertain times. *Nature*, v. 506, n. 7487, p. 153-155, 2014.
- BRASIL. *Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020–2030)*. Brasília, DF: MAPA, 2021.
- BREUILLIN-SESSOMS, F. et al. Nitrification gene ratio and free ammonia explain nitrite and nitrous oxide production in urea-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 111, p. 143-153, 2017.
- CARDOSO, A. S. et al. N<sub>2</sub>O emissions from urine-treated tropical soil: effects of soil moisture and compaction, urine composition, and dung addition. *Catena*, v. 157, p. 325-332, 2017.
- CAREY, J. C.; TANG, J. W.; TEMPLER, P. H.; KROEGER, K. D.; CROWTHER, T. W.; BURTON, A. J.; DUKES, J. S.; EMMETT, B.; FREY, S. D.; HESKEL, M. A. et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 113, n. 48, p. 13797-13802, 2016.
- CARMO, J. B. et al. A new approach to estimate soil N<sub>2</sub>O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 37, p. 1173-1181, 2005.
- CHANG, J. et al. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. *Nature Communications*, v. 12, p. 1-10, 2021.

- DANG, Z. Q. et al. Grazing exclusion effects on greenhouse gas emissions and soil organic carbon turnover. *Science of the Total Environment*, v. 858, 2023.
- DHAKAL, S. et al. Trends and drivers of emissions. In: IPCC. *Climate change 2022: mitigation of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- DIAS, N. M. S. *Efeito da aplicação de vinhaça na emissão de gases do efeito estufa e na comunidade desnitrificante e metanogênica do solo*. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- EGGLESTON, H. S. et al. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Hayama: IGES, 2006.
- EVANS, P. N. et al. An evolving view of methane metabolism in the Archaea. *Nature Reviews Microbiology*, v. 17, p. 219-232, 2019.
- FENG, Z. H. et al. Responses of soil greenhouse gas emissions to land-use conversion: a global meta-analysis. *Global Change Biology*, v. 28, n. 22, p. 6665-6678, 2022.
- FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. *Science*, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.
- GELFAND, I. et al. Short-term drought response of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 212, p. 127-133, 2015.
- GLATZEL, S.; STAHR, K. Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilized grassland in southern Germany. *Plant and Soil*, v. 231, p. 21-35, 2001.
- GOMES, J. *Emissão de gases do efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo*. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- HAN, M. G.; ZHU, B. Changes in soil greenhouse gas fluxes due to land-use change. *Global Change Biology*, v. 26, n. 4, p. 2656-2667, 2020.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.
- IPCC. *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- IPCC. *Mudança climática e terra: resumo para formuladores de políticas*. [S. l.]: IPCC, 2019.
- IQBAL, S. et al. Regenerative fertilization strategies and greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, v. 398, 2023.
- JENSEN, I. S. et al. Soil surface CO<sub>2</sub> flux as an index of soil respiration in situ. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 28, p. 1297-1306, 1996.

- KROEGER, M. E. et al. Deforestation effects on soil microbial communities. *Frontiers in Microbiology*, v. 9, p. 1635, 2018.
- KROEGER, M. E. et al. Rainforest-to-pasture conversion stimulates soil methanogenesis across the Brazilian Amazon. *The ISME Journal*, v. 15, n. 3, p. 658-672, 2021.
- LA SCALA JR., N. et al. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical soil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 32, p. 1469-1473, 2000.
- LA SCALA JR., N. et al. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems. *Soil and Tillage Research*, v. 62, p. 163-166, 2001.
- LIU, S. et al. Methane emissions in rice systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 319, 2021.
- LUO, G. J.; BRÜGGEMANN, N.; WOLF, B.; GASCHÉ, R.; GROTE, R.; BUTTERBACH-BAHL, K. Decadal variability of soil CO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes at the Höglwald Forest, Germany. *Biogeosciences*, v. 9, p. 1741-1763, 2012.
- MAEDA, K. et al. N<sub>2</sub>O production is a widespread trait in fungi. *Scientific Reports*, v. 5, 2015.
- MCSWINEY, C. P.; ROBERTSON, G. P. Nonlinear response of N<sub>2</sub>O flux to incremental fertilizer addition in a continuous maize (*Zea mays* L.) cropping system. *Global Change Biology*, v. 11, n. 10, p. 1712-1719, 2005.
- MAZZILLI, S. R.; KEMANIAN, A. R.; ERNST, O. R.; JACKSON, R. B.; PIÑEIRO, G. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 75, p. 273-281, 2014.
- MERLOTI, L. F. et al. Soil nitrogen cycling and N<sub>2</sub>O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 135, p. 1-10, 2019.
- MEYER, K. M. et al. Methane-cycling dynamics in Amazonia. *Environment International*, v. 145, 2020.
- MOGES, A.; DAGNACHEW, M.; YIMER, F. Land use effects on soil quality indicators. *Applied and Environmental Soil Science*, 2013.
- MONTZKA, S. A.; DLUGOKENCKY, E. J.; BUTLER, J. H. Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and climate change. *Nature*, v. 476, p. 43-50, 2011.
- OLDFIELD, E. E.; EAGLE, A. J.; RUBIN, R. L.; RUDEK, J.; SANDERMAN, J.; GORDON, D. R. *Agricultural soil carbon credits: understanding protocols for carbon sequestration and net greenhouse gas removal*. New York: Environmental Defense Fund, 2021.
- ONDIEK, R. A. et al. Soil greenhouse gas emissions from tropical wetlands. *Science of the Total Environment*, v. 787, 2021.

- PIHLATIE, M. et al. Nitrous oxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 18, 2004.
- PROSSER, J. I. et al. Nitrous oxide production by ammonia oxidizers. *Global Change Biology*, v. 26, 2020.
- PU, Y. et al. Soil N<sub>2</sub>O and NO<sub>x</sub> emissions linked to enzymatic activities. *Applied Soil Ecology*, 2019.
- REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, M. J. The effect of fall tillage on CO<sub>2</sub> flux. *Agronomy Journal*, v. 85, p. 1237-1243, 1993.
- SEEG. *Sistema de estimativas de emissões de gases de efeito estufa – Brasil*. [S. l.]: SEEG, 2021.
- SILVA, A. J. et al. Methane emissions in flooded soils. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1-10, 2011.
- TAN, L. S. et al. Land-use conversion increases greenhouse gas emissions. *Global Change Biology*, v. 26, n. 3, p. 1638-1653, 2020.
- TANG, S. M. et al. Grazing effects on soil greenhouse gas fluxes. *Science of the Total Environment*, v. 654, p. 1218-1224, 2019.
- TAVANTI, R. F. R. et al. CO<sub>2</sub> emissions in Brazilian Cerrado. *Catena*, v. 194, 2020.
- TAVANTI, R. F. R. et al. What is the impact of pasture reform on organic carbon compartments and CO<sub>2</sub> emissions in the Brazilian Cerrado? *Catena*, v. 194, p. 104702, 2020.
- VIEIRA, C. F. A. et al. Efeitos climáticos do metano. *Revista Tecnologia*, v. 29, n. 1, p. 72-83, 2008.
- VIEIRA, R. F. *Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas*. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- VOIGT, C.; LAMPRECHT, R. E.; MARUSHCHAK, M. E.; LIND, S. E.; NOVAKOVSKIY, A.; AURELA, M.; MARTIKAINEN, P. J.; BIASI, C. Warming of subarctic tundra increases emissions of all three important greenhouse gases—carbon dioxide, methane, and nitrous oxide. *Global Change Biology*, v. 23, n. 8, p. 3121-3138, 2017.
- WACHIYE, S. A. et al. Soil greenhouse gas emissions from sisal systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021.
- WANG, H. et al. Microbial-mediated emissions of greenhouse gas from farmland soils: a review. *Processes*, v. 10, n. 11, p. 2361, 2022.
- WIEBE, K.; ROBINSON, S.; CATTANEO, A. *Mudanças climáticas, agricultura e segurança alimentar*. Roma: FAO, 2019.
- YANG, L. et al. Global synthesis of soil greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, v. 804, 2022.

YANG, X. et al. Soil CO<sub>2</sub> emissions and organic carbon fractions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 240, p. 24-31, 2017.

ZHANG, Q. et al. Agricultural land use change impacts soil CO<sub>2</sub> emission and its <sup>13</sup>C-isotopic signature in central China. *Soil and Tillage Research*, v. 177, p. 105-112, 2018.

ZHANG, Y. et al. Land use conversion influences soil respiration across a desert oasis ecoregion in Northwest China, with consideration of cold season CO<sub>2</sub> efflux and its significance. *Catena*, v. 188, p. 104460, 2020.

ZUROVEC, O. et al. Soil pH and N<sub>2</sub>O emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 311, 2021.