



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**CLAYTON LUÍS BARAVELLI DE OLIVEIRA**

**UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA EM PASTAGEM  
SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SOLO ARENOSO**

Presidente Prudente - SP  
2024



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**CLAYTON LUÍS BARAVELLI DE OLIVEIRA**

**UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA EM PASTAGEM  
SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SOLO ARENOSO**

Tese apresentada Pró-Reitoria de Pesquisa,  
Pós-Graduação e Extensão, Universidade do  
Oeste Paulista, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia – Área de concentração:  
Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Edemar Moro  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto  
Batista

Presidente Prudente - SP  
2024

633.202  
O48u

Oliveira, Clayton Baravelli Luís de.

Utilização de fertilizante de eficiência aumentada em pastagem sob sistema de integração lavoura-pecuária em solo arenoso / Clayton Luís Baravelli de Oliveira. – Presidente Prudente, 2024.

84 f.: il., tabs., figs.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista – Unoeste, Presidente Prudente, SP, 2024.

Orientador: Edemar Moro.

Coorientador: Marcelo Augusto Batista.

1. Efeito estufa. 2. Inibidor de uréase. 3. Ureia formaldeído. I. Título.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTE DE EFICIÊNCIA AUMENTADA EM PASTAGEM SOB SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SOLO ARENOSO"**

**AUTOR(A): CLAYTON LUÍS BARAVELLI DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR(A): Prof. Dr. EDEMAR MORO**

Aprovado(a) como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR(A) em AGRONOMIA

Área de Concentração PRODUÇÃO VEGETAL, pela Comissão Examinadora:

**Prof. Dr. EDEMAR MORO**

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

**Prof. Dr. CARLOS SÉRGIO TIRITAN**

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

**Prof. Dr. MARCELO RAPHAEL VOLF**

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista / Presidente Prudente (SP)

**Prof. Dr. EDUARDO HENRIQUE LIMA MAZZUCHELLI**

IDR-PR - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – São Jorge do Ivaí (PR)

**Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI**

UNESP – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Dracena (SP)

Data da realização: Presidente Prudente, 01 de abril de 2024.

## Central de Assinaturas Eletrônicas

### Sobre o documento

Assunto: Documento eletrônico  
Status do documento: Concluído  
Data de criação do documento: 02/04/2024 08:48  
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília  
Número de assinaturas: 5  
Solicitante: KEID RIBEIRO KRUGER (#5739407)

### Signatários do documento

**CARLOS SÉRGIO TIRITAN (COORDENADOR DE CURSO)**

tiritan@unoeste.br

Recebido em 02/04/2024 08:48

Assinado em 02/04/2024 09:24

Assinatura Interna UNOESTE

Usando endereço IP: 177.131.33.2

ID da assinatura: 3070546

**EDEMAR MORO (PROFESSOR)**

edemar@unoeste.br

Recebido em 02/04/2024 08:48

Assinado em 02/04/2024 09:11

Assinatura Interna UNOESTE

Usando endereço IP: 2804:fec:d476:b700:596c:edc:5a36:b636

ID da assinatura: 3070545

**MARCELO RAPHAEL VOLF (FUNCIONÁRIO)**

marcelovolf@unoeste.br

Recebido em 02/04/2024 08:48

Assinado em 02/04/2024 09:12

Assinatura Interna UNOESTE

Usando endereço IP: 177.131.32.35

ID da assinatura: 3070547

**EDUARDO HENRIQUE LIMA MAZZUCHELLI (SIGNATÁRIO EXTERNO)**

eduardomazzuchelli@yahoo.com.br

Recebido em 02/04/2024 08:48

Assinado em 02/04/2024 10:56

Assinatura Interna UNOESTE

Usando endereço IP: 200.189.118.77

ID da assinatura: 3070548

**CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (SIGNATÁRIO EXTERNO)**

carolina.bonini@unesp.br

Recebido em 02/04/2024 08:48

Assinado em 02/04/2024 09:26

Assinatura Interna UNOESTE

Usando endereço IP: 186.217.249.46

ID da assinatura: 3070548

URL do documento: <https://www.unoeste.br/cal/c42a0088>

Assinatura digital do documento: 1c8552383998ab448523fa28ecf9e1715f6c92c21896ec9d3234b68f0c9f09f1

UNOESTE - Universidade do Oeste Paulista

Mantida pela EPEC - Empresa Prudentina de Educação e Cultura SA

## DEDICATÓRIA

À minha mãe Maria Shirley, meu pai Bianor (*in memoriam*), meu filho Iago e todos os amigos que me proporcionaram incentivo, amor, carinho, pela paciência, apoio e força, dedico.

A Deus, por me iluminar e me dar a oportunidade todos os dias de aprender e evoluir. A ti minha eterna gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por estar me proporcionando mais uma chance de evoluir, pelas oportunidades de crescimento diárias, pela consciência de que há algo maior do que eu, pela minha saúde, proteção durante esses 36 anos de vida, a Jesus por ser mestre e ser o exemplo de amor e bondade e a Francisco de Assis, pela sua humildade.

À universidade do Oeste Paulista – UNOESTE, por ter me proporcionado um ótimo ensino, com excelentes professores e todo aparato para que conseguisse concluir minha tese.

Ao Prof. Dr. Edemar Moro, pela oportunidade de orientação, confiança, compreensão, e principalmente paciência com meus erros. Manifesto minha gratidão pela grande contribuição em minha vida acadêmica, a você professor, meu muito obrigado!

Ao meu coorientador Prof. Dr. Marcelo Augusto Batista, que mesmo a distância se mostrou sempre presente e agregando muito neste processo tão difícil.

Ao Prof. Dr. Carlos Sérgio Tiritan, que apesar de não ter me orientado diretamente, entretanto, ajudou muito em todo o processo, sempre com muita calma, serenidade e respeito. Manifesto minha gratidão e saiba que és um grande exemplo de ser humano.

Aos professores/pesquisadores que aceitaram compor as bancas de qualificação e defesa. A todos os docentes do programa de mestrado do programa de pós-graduação de Produção Vegetal.

Aos técnicos de laboratório, por auxiliarem nesta jornada, ao Prof. Reges Heinrichs por ter cedido o laboratório e contribuído para que esta pesquisa fosse realizada.

Aos alunos e amigos que durante estes anos de pandemia, se arriscaram a sair de suas casas e foram me ajudar, foram muitos que passaram neste processo, e se por acaso esquecesse algum seria de grande ingratidão. Mas em especial cito aqui alguns companheiros de jornada, Daniel Silveira, Matheus Parra, Lara Rosa, Rubia Catharina, Ariele Boni, Lucas Hortence, Paulo Marques, João Vitor Bonardi, Ângelo Codonho, Juliana Françoso e André Cristovão.

A Juliana Bonfim, meus agradecimentos não caberiam em palavras, pois além de todo auxílio físico, que contribuíram em muito para a conclusão deste doutorado, há também o apoio emocional, afetivo, intelectual, se hoje eu concluo esse ciclo de minha vida, você foi fundamental para que isso se tornasse realidade.

Aos meus familiares em especial a minha mãe que por ter tido toda compreensão para enfrentar esta etapa, ao meu filho Iago que por muitas vezes serviu como plateia em meus ensaios, aos amigos por fazerem parte da minha vida e tornarem os meus dias mais leves.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa. MUITÍSSIMO OBRIGADO!!!

*“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”*  
*(Carl Jung)*

## RESUMO

### **Potencial dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada na redução de perdas de nitrogênio e carbono em sistema de integração lavoura-pecuária em solo arenoso**

A demanda por alimentos está em crescimento, apresentando desafios significativos para a produção sustentável e suficiente de alimentos para a humanidade. A integração lavoura-pecuária (ILP) surge como sistema de produção diversificado. Nesse sistema o manejo de pastagens tem como principal função otimização da produção de forragem. O objetivo do trabalho foi a utilização de fertilizantes com tecnologia agregada, ureia NBPT + Duromide e ureia formaldeído, que possam diminuir as perdas de nitrogênio (N) por volatilização de amônia ( $\text{N-NH}_3$ ) e consequentemente reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$ , no sistema ILP, e, portanto, mitigando os impactos do aquecimento global. As avaliações foram realizadas durante três anos agrícolas (2020-21, 2021-22 e 2022-23). A pastagem utilizada foi a *Urochloa Brizhanta* cv. *marandu* e a soja NS-6828 e NS-6700. O solo foi classificado como ARGISSOLO vermelho-amarelo com textura arenosa. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 3x4. Os tratamentos foram constituídos por três fontes de N, uma de liberação imediata a ureia convencional ( $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ ), uma de liberação lenta ureia formaldeído ( $\text{Ur}_{\text{Form}}$ ), e ureia com inibidor de urease e tecnologia Duromide ( $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ ), acrescidos de 4 doses (0, 100, 200 e 400  $\text{kg ha}^{-1}$  de N). As emissões de  $\text{CO}_2$  e carbono orgânico total (COT) foram testados a interação dose  $\times$  fonte para as variáveis analisadas, utilizando o software Statistical Analysis System. Os dados de volatilização de  $\text{N-NH}_3$  foram submetidos à regressão não linear usando um modelo logístico. As perdas de  $\text{N-NH}_3$  variaram de acordo com a dose e fertilizante, até 33% na  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ . A  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  perdeu eficiência nos anos avaliados, comparada a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ , diminuindo as perdas em 52% no primeiro ano para 46% no segundo e somente 5% no terceiro. A  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  variou menos, ficando entre 57% e 45% de redução nas perdas de  $\text{N-NH}_3$ . Os efeitos no COT e emissões de  $\text{CO}_2$  seguiram as mesmas tendências, enquanto a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  foi responsável pelas maiores emissões de  $\text{CO}_2$  e maior acúmulo de COT. A  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  apresentou redução

de até 6% comparado com  $Ur_{Conv}$  nas emissões dos gases do efeito estufa, e consequentemente menor acúmulo de COT. Conclui-se que o uso de tecnologia para aumento da eficiência nos fertilizantes nitrogenados, apresentaram resultados promissores na redução dos gases do efeito estufa, sendo uma boa alternativa em relação a fonte de ureia.

**Palavras-chave:** efeito estufa; inibidor de uréase; ureia formaldeído.

## ABSTRACT

### **Potential of enhanced efficiency nitrogen fertilizers in reducing nitrogen and carbon losses in sandy soil in integrated crop-livestock system**

The growing demand for food production poses significant challenges to sustainable agricultural practices. Integrated crop-livestock (ICL) systems have emerged as diversified approaches to address these challenges. Pasture management in these systems plays a crucial role in optimizing forage production and efficiently utilizing resources to enhance overall productivity. This study investigates the use of technologically advanced nitrogen fertilizers, specifically NBPT + Duromide-coated urea and formaldehyde-coated urea, aiming to reduce nitrogen (N) losses, particularly through ammonia volatilization ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), and consequently mitigate carbon dioxide emissions in sandy soil within the ICL system. Evaluations spanned three agricultural years (2020-21, 2021-22, and 2022-23), utilizing *Urochloa Brizhanta* cv. *marandu* pasture and NS-6828 and NS-6700 soybeans. The soil, characterized as dystrophic Ultisol, exhibited a sandy texture. Employing a randomized complete block design with four replications in a 3x4 factorial scheme, treatments included three N sources: conventional urea ( $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ ), slowrelease formaldehyde-coated urea ( $\text{Ur}_{\text{Form}}$ ), and urea with urease inhibitor and Duromide technology ( $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ ), each with four doses (0, 100, 200, and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N). Analysis of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) emissions and total organic carbon (TOC) involved testing for dose  $\times$  source interaction using Statistical Analysis System software. Nonlinear regression, employing a logistic model, was applied to  $\text{NH}_3\text{-N}$  volatilization data. Nitrogen losses varied with dose and fertilizer, reaching up to 33% with  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ .  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  exhibited declining efficiency over the evaluation period, resulting in losses reduced by 52% in the first year, 46% in the second, and only 5% in the third.  $\text{Ur}_{\text{Formaldehyde}}$  demonstrated less variability, with reductions in  $\text{NH}_3\text{-N}$  losses ranging from 57% to 45%. Trends in TOC and  $\text{CO}_2$  emissions mirrored each other, with  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  contributing to the highest  $\text{CO}_2$  emissions and TOC accumulation.  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  showed a promising up to 6% reduction compared to  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  in greenhouse gas emissions and, consequently, lower TOC accumulation. In conclusion, the use of technology to enhance nitrogen fertilizer efficiency presents

a promising avenue for reducing greenhouse gas emissions, providing a viable alternative in comparison to conventional urea sources.

**Keywords:** formaldehyde-coated urea; greenhouse gas emissions; urease inhibitor.

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 Atributos físico e químicos do solo na instalação do experimento. Presidente Bernardes, 2020.....                                                                                                                                                                                           | 19 |
| Tabela 2 Resumo das fases de pastagem e cultivo nos três anos de experimento...                                                                                                                                                                                                                      | 21 |
| Tabela 3 Parâmetros do modelo não linear (logístico) ajustados às perdas acumuladas de N-NH <sub>3</sub> para taxas de N de 100, 200 e 400 kg ha <sup>-1</sup> , e redução das perdas de N-NH <sub>3</sub> em comparação com ureia. Época de crescimento 2020-2022.....                              | 27 |
| 7                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
| Tabela 4 Atributos físico e químicos do solo na instalação do experimento. Presidente Bernardes, 2020.....                                                                                                                                                                                           | 53 |
| Tabela 5 Resumo das fases de pastagem e cultivo nos três anos de experimento.....                                                                                                                                                                                                                    | 55 |
| Tabela 6 Teor de proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, extrato etéreo (EE), matéria mineral (MM), digestibilidade in vitro (DIV) e fibra bruta na <i>Urochloa Brizantha</i> cv. <i>marandu</i> , para diferentes fontes e doses de N..... | 60 |
| Tabela 7 Teores de macronutrientes na <i>Urochloa Brizantha</i> cv. Marandu e na cultura da Soja.....                                                                                                                                                                                                | 61 |

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Volatilização acumulada de  $\text{N-NH}_3$  após aplicação de ureia ( $\text{Ur}_{\text{Cov}}$ ), Ur + duromide ( $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ ) e Ureia formaldeído ( $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ ) para as doses de 100, 200 e 400kg ha<sup>-1</sup> nos anos agrícolas de 2020 (a, b, c), 2021 (e, f, g), 2022 (i, j, k) e condições climáticas em 2020 (d), 2021 (h) e 2022 (l).....25
- Figura 2 Linhas representam as temperaturas do solo ( $T_{\text{solo}}$  °C), e barras a umidade do solo ( $U_{\text{solo}}$  %) durante o período de quantificação do  $\text{CO}_2$ , na pastagem nos anos agrícolas 2020, 2021 e 2022 (a) e na soja nas safras 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 (b).....28
- Figura 3 Fluxo de  $\text{CO}_2$  (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) das fontes de fertilizantes nitrogenados (barras) e doses (linhas) durante o período de quantificação na pastagem, anos agrícolas 2020 (a), 2021 (c) e 2022 (e). Acumulado de  $\text{CO}_2$  (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) afetado pelas fontes e doses durante o período de quantificação na pastagem anos agrícolas 2020 (b), 2021 (d) e 2022 (f).....29
- Figura 4 Fluxo de  $\text{CO}_2$  (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) das fontes de fertilizantes nitrogenados (barras) e doses (linhas) durante o período de quantificação na soja, safras 2020/21 (a), 2021/22 (c) e 2022/23 (e). A interação entre fonte x dose no acumulado de  $\text{CO}_2$  (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) durante o período de quantificação na soja, safras 2020/21 (b), 2021/22 (d) e 2022/23 (f).....30
- Figura 5 Carbono Orgânico total no solo, afetado pelas fontes e doses de fertilizantes nitrogenados após a safra 2020/21 (a), efeito das doses de N após a safra 2021/22 (b) e interação entre fontes e doses após a safra 2022/23 (c).....31
- Figura 6 Condições climáticas nos anos agrícolas 2020/21 (a), 2021/22 (b) e 2022/23 (c).....54
- Figura 7 Teor foliar de N da soja (3° trifólio) afetado pela interação entre fonte x dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2020-21 (A), 2021-22 (B) e afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2022-23 (C).....61
- Figura 8 Índice de Nutrição de N na *Urochloa Brizantha* cv. marandu afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (A), efeito das doses de N (B, C).....63

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 9  | Produção de Matéria Seca da <i>Urochloa Brizantha</i> cv. marandu afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (A), efeito das doses de N (B, C), Produção de proteína bruta total afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (D), efeito das doses de N (E, F)..... | 64 |
| Figura 10 | Produtividade da soja afetado pela interação entre fonte x dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2020-21 (A), safra 2021-22 (B) e safra 2022-23 (C).....                                                                                                                               | 65 |

## SUMÁRIO

|                         |                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CAPÍTULO I.....</b>  | <b>17</b>                                                                                                                                                                            |
| <b>1</b>                | <b>POTENCIAL DOS FERTILIZANTES NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA REDUÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO E CARBONO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SOL ARENOSO.....17</b> |
| <b>1.1</b>              | <b>Introdução.....17</b>                                                                                                                                                             |
| <b>1.2</b>              | <b>Materiais e métodos.....19</b>                                                                                                                                                    |
| 1.2.1                   | Área e delineamento experimental .....19                                                                                                                                             |
| 1.2.2                   | Sistema de Integração Lavoura-Pecuária e manejo do solo .....20                                                                                                                      |
| 1.2.3                   | Captura da volatilização de N-NH <sub>3</sub> .....22                                                                                                                                |
| 1.2.4                   | Emissão de CO <sub>2</sub> .....22                                                                                                                                                   |
| 1.2.5                   | Carbono orgânico total no solo.....23                                                                                                                                                |
| 1.2.6                   | Análise estatística .....23                                                                                                                                                          |
| <b>1.3</b>              | <b>Resultados.....24</b>                                                                                                                                                             |
| 1.3.1                   | Perdas N-NH <sub>3</sub> .....24                                                                                                                                                     |
| 1.3.2                   | Fluxo e emissões cumulativas de CO <sub>2</sub> .....28                                                                                                                              |
| 1.3.3                   | Carbono no solo .....30                                                                                                                                                              |
| <b>1.4</b>              | <b>Discussão .....31</b>                                                                                                                                                             |
| 1.4.1                   | Volatilização da amônia.....31                                                                                                                                                       |
| 1.4.2                   | Dióxido de Carbono.....33                                                                                                                                                            |
| 1.4.3                   | Carbono orgânico do solo .....35                                                                                                                                                     |
| <b>1.5</b>              | <b>Conclusão .....36</b>                                                                                                                                                             |
|                         | <b>REFERÊNCIAS.....37</b>                                                                                                                                                            |
| <b>CAPÍTULO II.....</b> | <b>45</b>                                                                                                                                                                            |
| <b>2</b>                | <b>OTIMIZAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SOLOS ARENOSOS COM USO DE FERTILIZANTE NITROGENADO DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA.....50</b>                       |
| <b>2.1</b>              | <b>Introdução.....50</b>                                                                                                                                                             |
| <b>2.2</b>              | <b>Materiais e métodos.....52</b>                                                                                                                                                    |

|            |                                                               |           |
|------------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.1      | Área e delineamento experimental .....                        | 52        |
| 2.2.2      | Sistema de Integração Lavoura-Pecuária e manejo do solo ..... | 55        |
| 2.2.3      | Análise da pastagem .....                                     | 56        |
| 2.2.4      | Análise da soja .....                                         | 58        |
| 2.2.5      | Análise de dados .....                                        | 58        |
| <b>2.3</b> | <b>Resultados .....</b>                                       | <b>58</b> |
| 2.3.1      | Composição química das plantas .....                          | 59        |
| 2.3.2      | Produção de cultura e forragem .....                          | 63        |
| <b>2.4</b> | <b>Discussão .....</b>                                        | <b>66</b> |
| 2.4.1      | Composição química e produção de forragem .....               | 66        |
| 2.4.2      | Estado nutricional e produtividade da soja .....              | 70        |
| <b>3</b>   | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                        | <b>74</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                      | <b>75</b> |

## CAPÍTULO I

### 1 POTENCIAL DOS FERTILIZANTES NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA REDUÇÃO DE PERDAS DE NITROGÊNIO E CARBONO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA EM SOLO ARENOSO

#### 1.1 Introdução

O aumento da população mundial, reflete diretamente no acréscimo da demanda por alimento, e produzir o suficiente de forma sustentável para humanidade é desafiador ao longo do tempo. A integração lavoura-pecuária (ILP) é um exemplo de sistema de produção diversificado que utiliza culturas e animais de forma que possam se complementar (Sekaran; Kumar; Luis Gonzalez-Hernandez, 2021). Globalmente, os sistemas ILP são reconhecidos por suas contribuições para o aprimoramento agrícola, pois intensificam de forma sustentável a produção de alimentos, beneficiando a renda do produtor, os solos e meio ambiente, além de aprimorar interações ecológicas, melhorando a ciclagem dos nutrientes, preservando recursos naturais, e contribuindo para saúde do solo (Franzluebbers, 2007; Lemaire *et al.*, 2014; Sekaran; Kumar; Luis Gonzalez-Hernandez, 2021).

A área cultivada no sistema ILP, representa 5% do total da pecuária e agricultura no Brasil, compreendendo em média 12,5 milhões de ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2016), representando uma oportunidade para melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Bonaudo *et al.*, 2014), principalmente em áreas degradadas, sobre solos arenosos. Estima-se que, somente no Brasil, existem mais de 100 milhões de ha de pastagens degradadas (Dias-Filho, 2014). E a integração vem sendo ótima opção para recuperação destas áreas. As produções de biomassa e potencial de ciclagem de nutrientes, resultam em aumento de 28% na produtividade da soja, em comparação com a soja cultivada sem resíduos de culturas no solo (Silva *et al.*, 2023).

A ILP realizada com soja e pastagem mista, afeta o crescimento das plantas devido o nitrogênio (N) fornecido pelas leguminosas, que é absorvido com maior eficiência quando comparado com aplicações via fertilização mineral, estimulando o crescimento das plantas e a qualidade da biomassa, ou ambos, por meio do aumento

da absorção de N (Silva *et al.*, 2022). Nesse sistema, o manejo de pastagens tem como principal objetivo a otimização da produção de forragem e seu uso eficiente para melhorar a produtividade do rebanho por ha. Considerando o manejo de pastagens sem prejudicar o solo e a cultura como intervenção que possibilita maior produção, a preocupação com a adubação e a lotação podem ser destacadas como fatores-chave nesse processo (Lorentz *et al.*, 2020). A fertilização nitrogenada aumenta o vigor de rebrota e a produtividade (Delevatti *et al.*, 2019), além de influenciar o rendimento do gado, valor nutricional das forragens, e variações na composição química da matéria seca (Meisser *et al.*, 2019).

Nas plantas, o N é o elemento mineral responsável pela síntese de aminoácidos, proteínas, enzimas e processos fotossintéticos (Taiz *et al.*, 2017). A ureia [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ] é a fonte mais comumente usada para atender às necessidades de N das plantas, pois apresenta vantagens industriais, como uma alta concentração de N por unidade de massa (45 a 46%) e custos de produção mais baixos do que outras fontes de N (Cantarella *et al.*, 2018). Uma vez aplicada ao solo, a ureia é hidrolisada pela ação da enzima urease, produzindo amônia ( $\text{N-NH}_3$ ), que é rapidamente perdida para a atmosfera na forma de gás (Woodley *et al.*, 2020). Essa perda pode ser responsável por mais de 60% do N aplicado (Pan *et al.*, 2016). Embora a  $\text{N-NH}_3$  não seja um gás de efeito estufa (GHG), a reação de hidrólise resulta na produção de  $\text{CO}_2$  (Cantarella *et al.*, 2018). Aliado a isso, a  $\text{N-NH}_3$  volatilizada pode ser oxidada e transformada em óxido nitroso ( $\text{N-N}_2\text{O}$ ) (Awale; Chatterjee, 2017), um gás de efeito estufa 298 vezes mais prejudicial que o dióxido de carbono ( $\text{C-CO}_2$ ) (Milam-Guerrero *et al.*, 2022). Esses gases produzidos são prejudiciais, devido ao seu alto potencial de aquecimento global e à permanência na atmosfera por longos períodos (Gorh; Baruah, 2019).

As perdas de  $\text{N-NH}_3$  em áreas agrícolas afetam a qualidade do ar e contaminam os ecossistemas terrestres e aquáticos (Liu *et al.*, 2013; Ti *et al.*, 2022). O setor de fertilizantes nitrogenados desenvolveu novas moléculas estabilizadoras para inibir a atividade da urease e propôs combinações de tecnologias de eficiência aprimorada para obter fertilizantes mistos (dois ou mais grânulos) e/ou complexos (grânulo único). Por exemplo, a nova tecnologia de estabilização Duromide + N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) reduziu as perdas de  $\text{N-NH}_3$  em 33% em comparação com apenas NBPT (Cassim *et al.*, 2021). Existem os fertilizantes de liberação lenta, produtos da condensação da ureia com aldeídos para liberar o nutriente mais lentamente do que

as fontes convencionais (Guelfi, 2017). Entre os mais usados está a ureia-formaldeído ( $Ur_{Formaldeído}$ ) (Cassim *et al.*, 2020). Essa tecnologia necessita ser quebrada por enzimas ou organismos no solo para ficarem disponíveis para plantas (Cardoso; Andreote, 2016; Oliveira *et al.*, 2022; Reetz, 2016).

Nossa hipótese é que os fertilizantes com tecnologia de eficiência aumentada, ureia NBPT + Duromide e ureia formaldeído, possam diminuir as perdas de N por volatilização de  $N-NH_3$ , e consequentemente reduzir as emissões de  $C-CO_2$  no sistema ILP em solo arenoso, mitigando os impactos do aquecimento global. Nossos objetivos foram avaliar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados na diminuição das perdas por volatilização  $N-NH_3$  e a diminuição nas emissões de  $CO_2$  no sistema de ILP em solo arenoso.

## 1.2 Materiais e métodos

### 1.2.1 Área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido durante três anos agrícolas (2020-21, 2021-22 e 2022-23) na Fazenda Experimental da UNOESTE em Presidente Bernardes (22°17'27" S; 51°40'51" W) a 385 m acima do nível do mar, estado de São Paulo, Brasil. O clima da região segundo a classificação de Köppen, é classificado como Aw (Alvares *et al.*, 2013), com temperaturas médias anuais em torno de 25 °C e precipitação média anual de 1.558 mm. O solo é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distroférrico com textura arenosa (SANTOS *et al.*, 2018), correspondendo a um Ultisol distrofic (Soil Survey Division, 2014). As propriedades físicas e químicas do solo das camadas de 0,00 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 Atributos físico e químicos do solo na instalação do experimento. Presidente Bernardes, 2020.

| Cama<br>da<br>M | pH<br>CaCl <sub>2</sub> | MO                 | P                   | K                                             | Ca   | Mg  | Al  | H+Al | SB   | CT<br>C |
|-----------------|-------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------------|------|-----|-----|------|------|---------|
|                 |                         | g kg <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | -----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- |      |     |     |      |      |         |
| 0-0,20          | 4,80                    | 17,6               | 8,69                | 1,4                                           | 12,3 | 8,1 | 0,2 | 38,5 | 21,8 | 60,3    |
| 0,20-<br>0,40   | 4,60                    | 10,1               | 2,37                | 1,7                                           | 6,5  | 5,0 | 1   | 36   | 13,2 | 49,2    |

| Cama<br>da<br>M | Areia                         | Silte | Argila | V           | m    | S                               | B    | Cu   | Fe    | Mn   | Zn   |
|-----------------|-------------------------------|-------|--------|-------------|------|---------------------------------|------|------|-------|------|------|
|                 | -----g kg <sup>-1</sup> ----- |       |        | -----%----- |      | ----- mg dm <sup>-3</sup> ----- |      |      |       |      |      |
|                 | ---                           |       |        | ---         |      | -----                           |      |      |       |      |      |
| 0-0,20          | 796                           | 32    | 172    | 36,15       | 0,91 | 2,97                            | 0,10 | 0,96 | 180,6 | 52,1 | 2,16 |
| 0,20-<br>0,40   | 768                           | 32    | 201    | 26,83       | 7,04 | 2,40                            | 0,08 | 0,96 | 186,2 | 34,2 | 0,66 |

pH (CaCl<sub>2</sub>) (0,01 mol L<sup>-1</sup>) na relação solo/solução de 1:2,5; H + Al determinado pelo método Shoemaker-McLean-Pratt (SMP); Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> extraídos com KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; MO: matéria orgânica do solo obtido por carbono orgânico × 1,724 (Walkley-Black); P, K<sup>+</sup>, Zn, Cu, Fe e Mn: extração por Mehlich-1; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> extraído por fosfato de cálcio em ácido acético; B extraído com água quente; soma de bases (SB): (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>); CTC: capacidade de troca catiônica em pH 7 (SB + H + Al); m%: saturação por Al (Al<sup>3+</sup>/CTCe: capacidade efetiva de troca catiônica (SB + Al<sup>3+</sup>); V%: saturação por bases [(SB/CEC) × 100] e distribuição de tamanho de partícula (areia, silte e argila): método do densímetro.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 3x4. Os tratamentos foram constituídos por três fontes de N, uma de liberação imediata ureia convencional (Ur<sub>Conv</sub>, com 45% de N), uma de liberação lenta ureia formaldeído (Ur<sub>Form</sub>, com 39% de N), e ureia estabilizada com inibidor de urease e tecnologia Duromide (Ur<sub>Duromide</sub>, com 45% de N), sendo que estas fontes foram aplicadas em doses crescentes de N (0, 100, 200, 400 kg ha<sup>-1</sup>). Após o perfilhamento da pastagem aplicou-se os fertilizantes nitrogenados. A aplicação foi feita a lanço. As parcelas foram compostas por 24,5 m<sup>2</sup>, sendo 3,5 m de largura por 7 m de comprimento.

### 1.2.2 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária e manejo do solo

A acidez do solo foi corrigida com aplicação de calcário dolomítico [CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] na dose 1.337 kg ha<sup>-1</sup> com um poder relativo de neutralização total de 72%, quantidade necessária para elevar o pH (CaCl<sub>2</sub>) para 5,5, conforme recomendado (Raij *et al.*, 1997). A calagem foi realizada em abril de 2020 na superfície do solo sem incorporação. A pastagem já estava estabelecida e houve a homogeneização da área para semeadura. A pastagem começou em maio/março de 2020, 2021 e 2022 e terminaram entre setembro e outubro (Tabela 2). A depender das condições climáticas a cultivar foi dessecada cerca de 30 dias antes da previsão da semeadura da soja,

para isso fora utilizado herbicida Glyphosato (*N*-(fosfometil) glicina) na dose de 6 L ha<sup>-1</sup> com calda de 120 L ha<sup>-1</sup>.

A adubação de semeadura da soja foi realizada com 60 kg de P, 60 kg de K e 36 kg de S para todos os anos de cultivo (Tabela 2), e as fontes utilizadas foram superfosfato simples no sulco de semeadura e cloreto de potássio a lanço em área total. A semeadura foi realizada com distribuição de 14,9 sementes m<sup>-1</sup> com espaçamento de 0,45 m, totalizando 331.107 pl ha<sup>-1</sup>. As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, e inoculação com 60 mL *Bradyrhizobium japonicum* (nas três safras) e *Azospirillum* (duas safras finais) foi realizada por cobertura (spray na linha de plantio).

Tabela 2 Resumo das fases de pastagem e cultivo nos três anos de experimento.

| Pastagem                                                                                  | Ano agrícola          |                                             |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                                                                           | 2020                  | 2021                                        | 2022                                        |
| Período de ocupação <sup>1</sup>                                                          |                       |                                             |                                             |
| Começo (semeadura)                                                                        | 04 de abril           | 19 de abril                                 | 30 de março                                 |
| Fim (dessecação)                                                                          | 20 de outubro         | 1 de outubro                                | 25 de setembro                              |
| Dias de ocupação                                                                          | 200                   | 166                                         | 208                                         |
| <i>Urochloa Brizantha</i>                                                                 | cv. marandu           | cv. marandu                                 | cv. marandu                                 |
| Taxa de semeadura (kg ha <sup>-1</sup> )                                                  | 12                    | 12                                          | 12                                          |
| Adubação com Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> de N)                                        | (100, 200 e 400)      | 100, 200 e 400)                             | 100, 200 e 400)                             |
| <hr/>                                                                                     |                       |                                             |                                             |
| Cultivo                                                                                   | Safrá                 |                                             |                                             |
|                                                                                           | 2020/2021             | 2021/2022                                   | 2022/2023                                   |
| Semeadura                                                                                 | 23 de novembro        | 21 de outubro                               | 27 de outubro                               |
| Colheita                                                                                  | 26 de março           | 30 de março                                 | 23 de março                                 |
| Dias de cultivo                                                                           | 124                   | 161                                         | 148                                         |
| Soja cultivar                                                                             | NS – 6828             | NS – 6700                                   | NS - 6700                                   |
| Taxa de semeadura (kg ha <sup>-1</sup> )                                                  | 65                    | 65                                          | 65                                          |
| Inoculação                                                                                | <i>Bradyrhizobium</i> | <i>Bradyrhizobium</i> e <i>Azospirillum</i> | <i>Bradyrhizobium</i> e <i>Azospirillum</i> |
| Adubação com Fósforo (kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sup>2</sup> | 60                    | 60                                          | 60                                          |
| Adubação com Potássio (kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O) <sup>3</sup>              | 60                    | 60                                          | 60                                          |
| Adubação com Enxofre (kg ha <sup>-1</sup> de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) <sup>2</sup> | 36                    | 36                                          | 36                                          |

<sup>1</sup> simulação de pastejo, sem a presença animal, <sup>2</sup> Super simples (20% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 12% de S), <sup>3</sup> KCl (60% de K)

### 1.2.3 Captura da volatilização de N-NH<sub>3</sub>

Para quantificar a volatilização da N-NH<sub>3</sub>, os fertilizantes nitrogenados foram pesados separadamente com uma balança analítica e aplicados manualmente dentro da câmara estática semiaberta com uma área total de 0,007854 m<sup>2</sup>. Imediatamente após a aplicação de N, foram coletadas amostras nos dias 2, 5, 9, 14, 20, 27 dias após a aplicação do fertilizante para quantificar a volatilização de N-NH<sub>3</sub>, totalizando seis coletas. Em resumo, uma câmara estática semiaberta foi colocada em cada parcela. As câmaras consistiam em garrafas PET contendo uma tira de papel filtro de 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento com sua base imersa em um frasco de 50 cm<sup>3</sup> com 20 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 mol L<sup>-1</sup> e solução de glicerina a 2 % (v/v) (Araújo *et al.*, 2009). As câmaras usadas foram substituídas por novas até que a perda de amônia se estabilizasse. Após cada coleta, as câmaras foram alternadas entre locais dentro de cada parcela para minimizar os efeitos de fatores ambientais, como chuvas. Posteriormente, as amostras foram enviadas ao laboratório e refrigeradas até a análise. A N-NH<sub>3</sub> capturada foi determinada de acordo com a metodologia azul-de-salicilato descrita por Bower; Holm-Hansen, (1980), usando espectrofotometria a 697 nm.

### 1.2.4 Emissão de CO<sub>2</sub>

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo foi registrada com sistema automatizado portátil de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo LI-COR (LI-8100) a partir de metodologia proposta por (Janssens *et al.*, 2000). A medição foi realizada sempre no período da manhã, entre 7:00 e 9:00 am. O sistema LI-8100 monitora as mudanças na concentração de CO<sub>2</sub> dentro da câmara, por meio de espectroscopia, na região do infravermelho (IRGA - Infrared Gas Analyzer). A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm<sup>3</sup>, com área de contato de 83,7 cm<sup>2</sup>, e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 0,02 m.

Para quantificar a emissão de CO<sub>2</sub> durante a pastagem, os fertilizantes nitrogenados foram pesados separadamente com uma balança analítica e aplicados manualmente dentro da câmara (PVC) estática semiaberta com área total de 0,0283 m<sup>2</sup>. Imediatamente após a aplicação de N, foram coletadas amostras nos dias 2, 9, 16, 23, 36 dias após a aplicação do fertilizante para quantificar a emissão de CO<sub>2</sub>,

totalizando seis coletas. Para as determinações na cultura da soja foram avaliados os dias 1, 9, 15, 29, 42, 58, 71, 116 subsequentes a emergência da cultura, totalizando oito coletas. Adjacente às câmeras (bases de PVC) foi monitorada a temperatura do solo ( $T_{solo}$ ) por meio de equipamento portátil digital com sensores de temperatura. A umidade volumétrica ( $U_{solo}$ ) foi medida por meio de coleta com sonda de 0-10 cm e estimada com auxílio de balança e estufa a 105 °C. A partir destes dados, foi possível obter a quantidade de C-CO<sub>2</sub> emitida à atmosfera em g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>.

#### 1.2.5 Carbono orgânico total no solo

Com auxílio de uma sonda, foi coletado a camada de solo 0,00 – 0,10 m dois dias após a colheita da soja. Foi determinado a matéria orgânica (MO) pelo método de Walkley-Black (FAO, 2021; Raij *et al.*, 1997). Em um frasco cônico, foram colocados 1 cm<sup>3</sup> de solo e adicionados 10 ml de K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,167 mol L<sup>-1</sup>. Em seguida, 20 ml de ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) foram adicionados à mistura de solo, e o frasco foi agitado suavemente. A leitura foi realizada por meio do método de espectrofotometria a 697 nm. Para conversão da MO em C orgânico total (COT) usou a seguinte equação:

$$COT = \frac{MO}{1,724} \quad \text{Eq. 1}$$

#### 1.2.6 Análise estatística

Para volatilização da N-NH<sub>3</sub> o modelo foi processado de acordo com o critério de informação da Akaike (AIC) (Akaike, 1974), e os modelos com AIC menores foram escolhidos. Depois de selecionar o modelo, os dados foram submetidos a regressão não linear, utilizando o modelo logístico representado pela equação 2, tal como descrita por Seber; Wild, (2003). O modelo é tradicionalmente utilizado para estimar a volatilização acumulada da amônia (Cantarella *et al.*, 2018; Minato *et al.*, 2019, 2020; Silva *et al.*, 2017).

$$\hat{Y} = \frac{\alpha}{1 + \exp\left[-\frac{(t-\beta)}{\gamma}\right]} \quad \text{Eq.2}$$

No qual  $\hat{Y}$  é a quantidade de N volatilizada na forma de NH<sub>3</sub>-N (kg ha<sup>-1</sup>) no momento  $t$ ;  $\alpha$  é a volatilização acumulada máxima;  $\beta$  é o momento em que ocorrem

50 % das perdas, correspondente ao ponto de inflexão da curva (dia em que a perda máxima diária de N-NH<sub>3</sub> ocorre);  $t$  é o tempo (dias); e  $\gamma$  é um parâmetro da equação utilizada para calcular a perda máxima diária (PMD) de N-NH<sub>3</sub>, como se mostra na equação 3.

$$PMD = \frac{\alpha}{4\gamma} \quad \text{Eq.3}$$

Os dados de CO<sub>2</sub>, umidade do solo e temperatura do solo foram verificados quanto à homogeneidade da variância e normalidade de resíduos. Seguindo os pré-requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com probabilidade de 5% ( $p < 0,05$ ). Constatada significância, as médias das fontes de P foram comparadas entre si pelo teste de Tukey e as doses por equações de regressão (Pimentel-Gomes, 2009). Os dados foram analisados pelo software Statistical Analysis System (SAS®, 2022). Os gráficos foram traçados utilizando Sigmaplot® 15.

### 1.3 Resultados

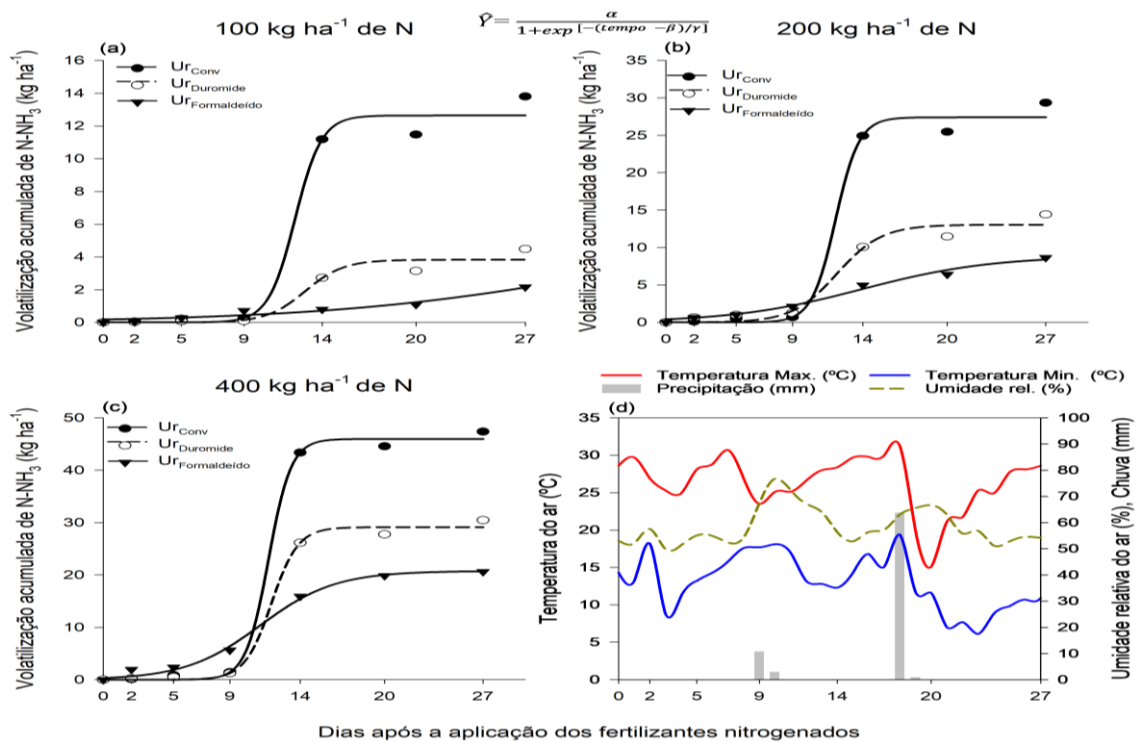
#### 1.3.1 Perdas N-NH<sub>3</sub>

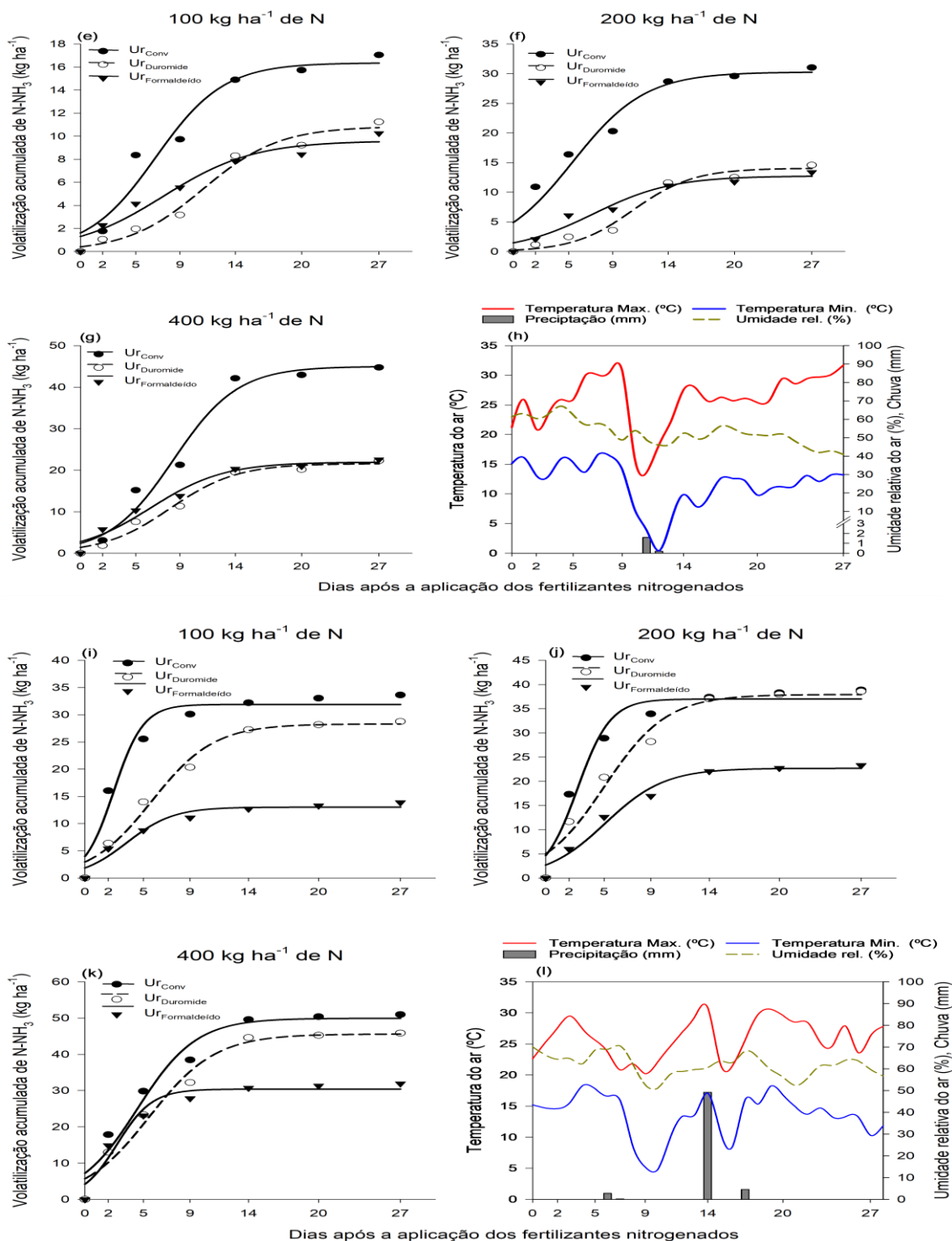
Nos três anos de medição a Ur<sub>Conv</sub> apresentou maiores perdas de N-NH<sub>3</sub>, comparadas as demais fontes, em ambos os anos a dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> obteve a maior concentração variando entre 44,7 a 50,9 kg ha<sup>-1</sup> de amônia (figura 2 c, g, k). Além disso a Ur<sub>Conv</sub> de modo geral foi mais rápida para perder 50% da N-NH<sub>3</sub> parâmetro  $\beta$ , (Tabela 3), sendo no primeiro ano levando entre 11 e 12 dias, no segundo entre 5 e 8 dias e no último a diferença foi menor, entre 2 e 4 dias. A porcentagem de perda não segue o acréscimo das doses, sendo que no segundo e terceiro ano de medição, a Ur<sub>Conv</sub> na dose 100 kg ha<sup>-1</sup> perdeu 17% e 33% respectivamente, sendo a dose de 200kg ha<sup>-1</sup> perdendo 15% e 19% e a dose de 400kg ha<sup>-1</sup>, 11 e 13% no mesmo período.

De modo geral, a Ur<sub>Duromide</sub> segue a mesma tendência da Ur<sub>Conv</sub>, com a dose de 400kg ha<sup>-1</sup>, obtendo as maiores perdas de N-NH<sub>3</sub>, variando entre 22 e 45 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 2 c, g, k), o que representou perda de 5% e 11% respectivamente. A Ur<sub>Duromide</sub> levou mais tempo para perder 50% ( $\beta$ , Tabela 3), no primeiro ano em média 12 dias, no segundo variou entre 9 e 11 dias e no terceiro ano demorou em média 5 dias.

Assim como a  $Ur_{Conv}$  a dose menor tem maior porcentual de perda em relação as maiores, sendo no segundo e terceiro ano as perdas da dose de  $100\text{ kg ha}^{-1}$  ficaram entre 11% e 28% contra 7% e 19% da dose de  $200\text{ kg ha}^{-1}$  no mesmo período. As reduções de perda da  $Ur_{Duromide}$  em relação a  $Ur_{Conv}$  (Tabela 3) foram diminuindo conforme os anos, no primeiro a redução média foi de 52%, no segundo 46% e no último de 10%.

Figura 1 Volatilização acumulada de  $N-NH_3$  após aplicação de ureia ( $Ur_{Conv}$ ),  $Ur + Duromide$  ( $Ur_{Duromide}$ ) e Ureia formaldeído ( $Ur_{Formaldeído}$ ) para as doses de 100, 200 e  $400\text{ kg ha}^{-1}$  nos anos agrícolas de 2020 (a, b, c), 2021 (e, f, g), 2022 (i, j, k) e condições climáticas em 2020 (d), 2021 (h) e 2022 (l).





A  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  seguiu a mesma tendência da  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  e  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ , no qual, obteve perdas lineares com acréscimo das doses, entretanto, as perdas pela  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  foram menores em comparação as demais fontes. A dose de 400kg ha<sup>-1</sup> apresentou as maiores perdas de  $\text{N-NH}_3$ , variando entre 20,6 e 31,9 kg ha<sup>-1</sup> entre os anos de avaliação (figura 1 c, g, k), representando perda de 5 e 7% respectivamente do total aplicado. O tempo que a  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  foi diminuindo com passar dos anos para perder

50% de N-NH<sub>3</sub> ( $\beta$ , Tabela 3), sendo 19, 7 e 4 dias em média para perder metade do N aplicado. A Ur<sub>Formaldeído</sub> diminuiu a redução e perda de amônia em relação a Ur<sub>Cov</sub>, no primeiro ano a diminuição em média foi de 57,8%, nos anos seguintes foram de 50,1% e 45,6% respectivamente.

Tabela 3 Parâmetros do modelo não linear (logístico) ajustados às perdas acumuladas de N-NH<sub>3</sub> para taxas de N de 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>, e redução das perdas de N-NH<sub>3</sub> em comparação com ureia. Época de crescimento 2020-2022

| Fonte                     | Dose<br>(kg<br>ha <sup>-1</sup><br>de<br>N) | Ano<br><br>Agrícola | Parâmetros                                                |          |                    | R <sup>2</sup> | PMD<br><br>kg ha <sup>-1</sup><br>dia <sup>-1</sup><br>N-NH <sub>3</sub> | Redução<br>das<br>perdas<br>de<br>N-NH <sub>3</sub><br>em<br>relação<br>a ureia<br>(%) |
|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------|----------|--------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                           |                                             |                     | $\alpha$<br><br>kg ha <sup>-1</sup> N-<br>NH <sub>3</sub> | $\gamma$ | $\beta$<br><br>dia |                |                                                                          |                                                                                        |
| Ur <sub>Cov</sub>         | 100                                         | 2020                | 12,64                                                     | 0,85     | 12,26              | 0,99           | 3,72                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 200                                         |                     | 27,4                                                      | 0,84     | 12,06              | 0,99           | 8,15                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 400                                         |                     | 45,96                                                     | 0,8      | 11,74              | 0,99           | 14,36                                                                    | —                                                                                      |
| Ur <sub>Duromide</sub>    | 100                                         |                     | 3,82                                                      | 1,23     | 12,93              | 0,96           | 0,78                                                                     | 69,8 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 13,1                                                      | 1,59     | 12,18              | 0,97           | 2,05                                                                     | 52,4 <sup>(2)</sup>                                                                    |
|                           | 400                                         |                     | 29,11                                                     | 0,94     | 11,94              | 0,99           | 7,74                                                                     | 36,6 <sup>(3)</sup>                                                                    |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> | 100                                         |                     | 6,17                                                      | 9,33     | 32,97              | 0,95           | 0,17                                                                     | 51,2 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 8,87                                                      | 4,59     | 13,93              | 0,98           | 0,48                                                                     | 67,6 <sup>(2)</sup>                                                                    |
|                           | 400                                         |                     | 20,74                                                     | 2,66     | 11,15              | 0,99           | 1,95                                                                     | 54,9 <sup>(3)</sup>                                                                    |
| Ur <sub>Cov</sub>         | 100                                         | 2021                | 16,36                                                     | 3,07     | 6,8                | 0,95           | 1,33                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 200                                         |                     | 30,27                                                     | 3,27     | 5,4                | 0,94           | 2,31                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 400                                         |                     | 44,98                                                     | 2,90     | 8,4                | 0,97           | 3,88                                                                     | —                                                                                      |
| Ur <sub>Duromide</sub>    | 100                                         |                     | 10,85                                                     | 3,44     | 11,08              | 0,98           | 0,79                                                                     | 33,7 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 14,05                                                     | 2,72     | 10,86              | 0,97           | 1,29                                                                     | 55,6 <sup>(2)</sup>                                                                    |
|                           | 400                                         |                     | 21,58                                                     | 3,03     | 8,1                | 0,98           | 1,78                                                                     | 52,1 <sup>(3)</sup>                                                                    |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> | 100                                         |                     | 9,59                                                      | 4,06     | 7,49               | 0,95           | 0,59                                                                     | 41,4 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 12,74                                                     | 3,56     | 7,25               | 0,95           | 0,89                                                                     | 57,9 <sup>(2)</sup>                                                                    |
|                           | 400                                         |                     | 21,93                                                     | 3,31     | 6,37               | 0,96           | 1,66                                                                     | 51,2 <sup>(3)</sup>                                                                    |
| Ur <sub>Cov</sub>         | 100                                         | 2022                | 31,9                                                      | 1,26     | 2,5                | 0,96           | 6,33                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 200                                         |                     | 37,01                                                     | 1,4      | 2,7                | 0,96           | 6,61                                                                     | —                                                                                      |
|                           | 400                                         |                     | 49,91                                                     | 2,52     | 4,47               | 0,95           | 4,95                                                                     | —                                                                                      |
| Ur <sub>Duromide</sub>    | 100                                         |                     | 28,31                                                     | 2,66     | 5,71               | 0,98           | 2,66                                                                     | 11,2 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 37,94                                                     | 2,67     | 5,05               | 0,96           | 3,55                                                                     | -                                                                                      |
|                           | 400                                         |                     | 45,57                                                     | 2,83     | 5,5                | 0,97           | 4,03                                                                     | 8,7 <sup>(3)</sup>                                                                     |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> | 100                                         |                     | 13,02                                                     | 1,99     | 3,57               | 0,95           | 1,64                                                                     | 59,2 <sup>(1)</sup>                                                                    |
|                           | 200                                         |                     | 22,69                                                     | 2,54     | 5,1                | 0,97           | 2,23                                                                     | 38,7 <sup>(2)</sup>                                                                    |
|                           | 400                                         |                     | 30,39                                                     | 1,5      | 2,74               | 0,95           | 5,10                                                                     | 39,1 <sup>(3)</sup>                                                                    |

<sup>(1)</sup> Redução das perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>

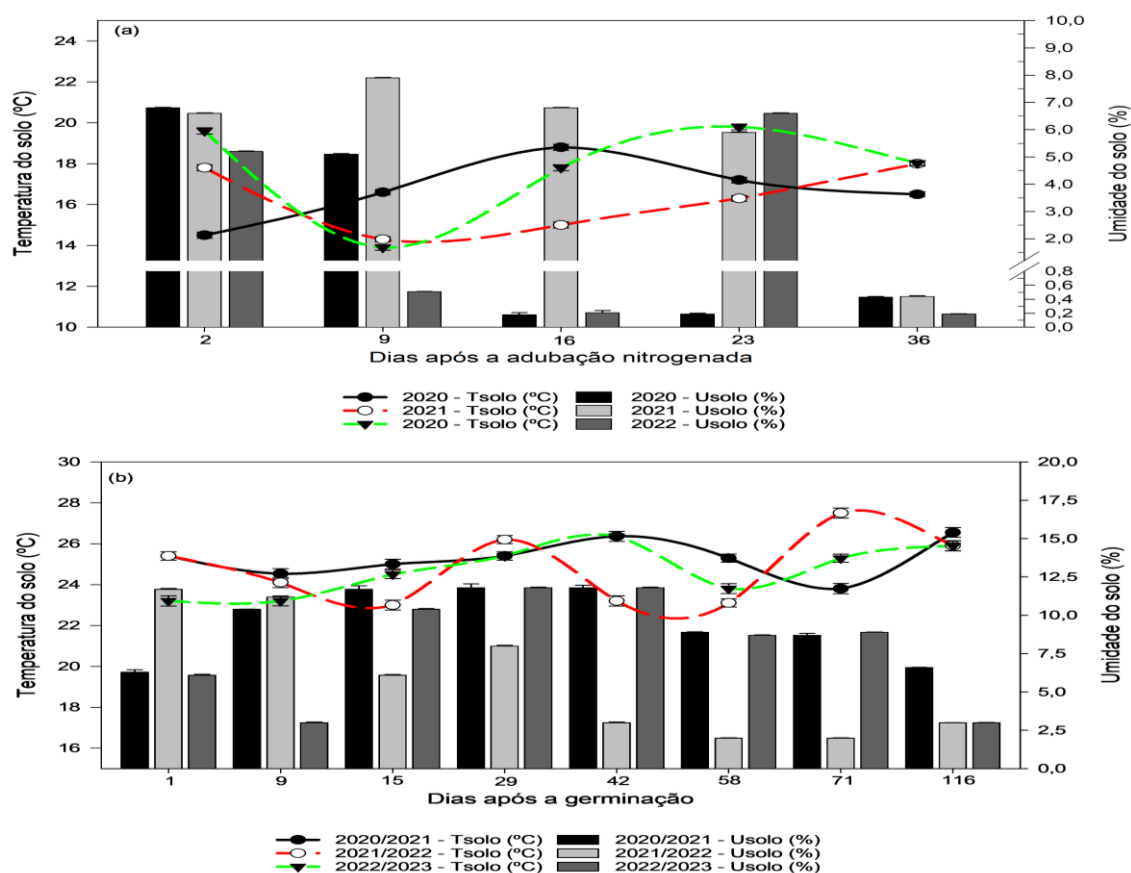
(2) Redução das perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação a dose de 200 kg ha<sup>-1</sup>

(3) Redução das perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação a dose de 400 kg ha<sup>-1</sup>

### 1.3.2 Fluxo e emissões cumulativas de CO<sub>2</sub>

As doses e fontes de N não apresentaram diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para temperatura do solo (Tsolo) e umidade do solo (Usolo) nas medições de CO<sub>2</sub>, nos três anos de avaliação na pastagem (Figura 2 a), e nos três anos de medição na cultura da soja (Figura 2 b).

Figura 2 Linhas representam as temperaturas do solo (Tsolo °C), e barras a umidade do solo (Usolo %) durante o período de quantificação do CO<sub>2</sub>, na pastagem nos anos agrícolas 2020, 2021 e 2022 (a) e na soja nas safras 2020/2021, 2021/2022 e 2022/2023 (b).

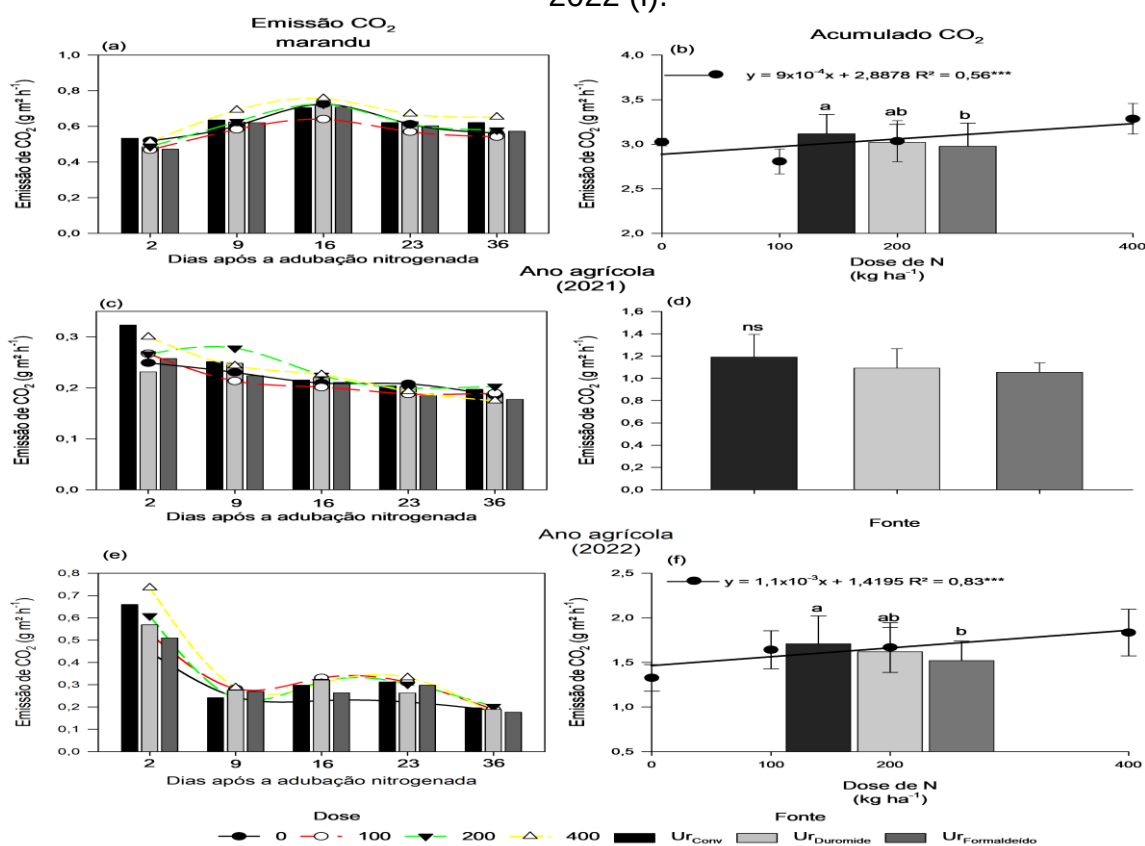


O fluxo acumulado de CO<sub>2</sub>, variou de acordo com as fontes e doses aplicadas, no primeiro ano de avaliação, sendo a fonte que obteve maior emissão foi Ur<sub>Conv</sub> (3,11 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>), não diferenciando da Ur<sub>Duomide</sub> (3,01 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) sendo superior a Ur<sub>Formaldeído</sub> (2,97 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>). Em relação as doses, houve resposta linear positiva, sendo a dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> com maior emissão de CO<sub>2</sub> (3,28 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) (Figura 3 b). Resultados esses

que não se repetiram no próximo ano de avaliações (Figura 3 d), não ocorrendo diferença significativa ( $p > 0,05$ ).

No terceiro ano de avaliação, os fluxos acumulados de  $\text{CO}_2$ , seguiu as mesmas tendências do primeiro, e variou entre fontes e doses aplicadas, a fonte  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  ( $1,71 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) teve maior emissão, não diferindo da  $\text{Ur}_{\text{Duomide}}$  ( $1,62 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) e diferindo da  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  ( $1,52 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). As doses apresentaram comportamento linear positivo e a dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  apresentou a concentração de  $1,83 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .

Figura 3 Fluxo de  $\text{CO}_2$  ( $\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) das fontes de fertilizantes nitrogenados (barras) e doses (linhas) durante o período de quantificação na pastagem, anos agrícolas 2020 (a), 2021 (c) e 2022 (e). Acumulado de  $\text{CO}_2$  ( $\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ) afetado pelas fontes e doses durante o período de quantificação na pastagem anos agrícolas 2020 (b), 2021 (d) e 2022 (f).

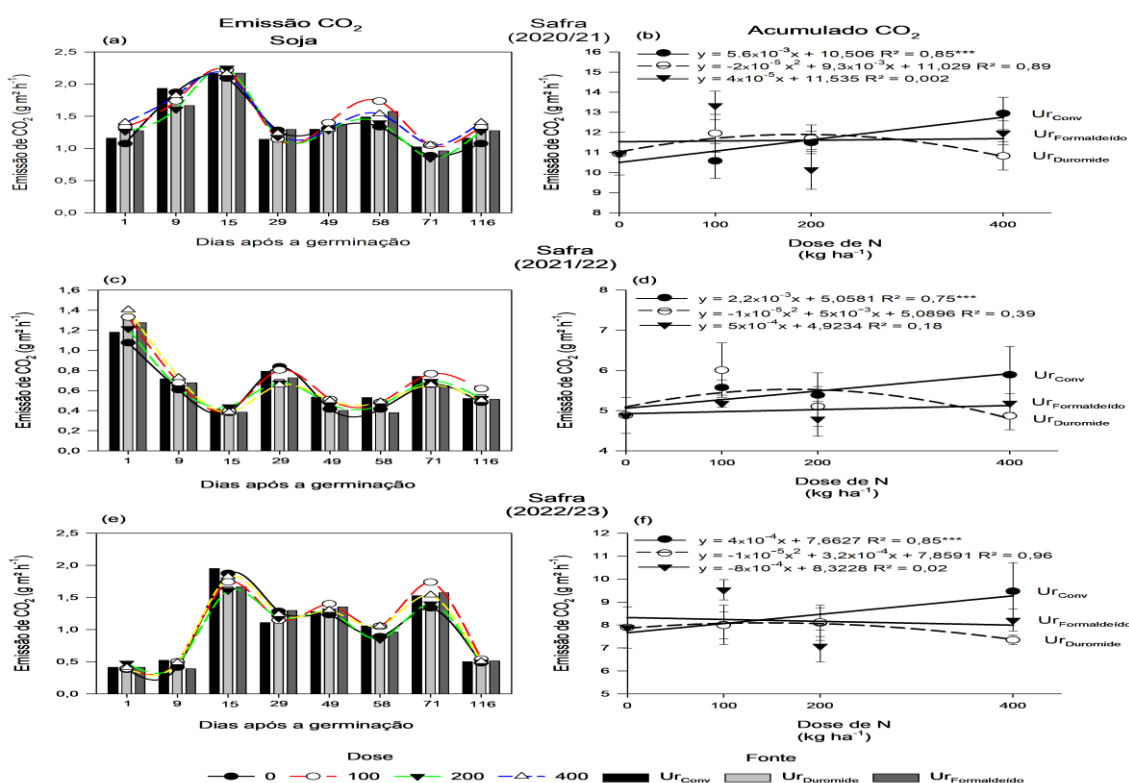


As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ). \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

Nos três anos avaliados o acumulado de  $\text{CO}_2$  (Figura 4 b, d, f) houve interação entre fonte x dose, as concentrações variaram entre os anos, entretanto, o modelo apresentando pelas fontes foram semelhantes, sendo a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  respondendo linearmente positivo as doses de N aplicadas, e a dose  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  apresentando

maior concentração nos três anos 12,94, 5,98 e 9,46 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>, respectivamente. A  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  não se ajustou a um modelo, entretanto no segundo e terceiro ano de avaliações emitiu 7.8% e 2.2% a menos comparada a  $Ur_{\text{Conv}}$ . A fonte  $Ur_{\text{Duromide}}$  respondeu de forma quadrática negativa, sendo que, nos três anos as menores emissões foram na dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> (10,28, 4,86 e 7,35 g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> respectivamente), no primeiro ano a  $Ur_{\text{Duromide}}$  reduziu em média 1% em relação a fonte  $Ur_{\text{Conv}}$  e 4% e 6.2% nos anos seguintes.

Figura 4 Fluxo de CO<sub>2</sub> (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) das fontes de fertilizantes nitrogenados (barras) e doses (linhas) durante o período de quantificação na soja, safras 2020/21 (a), 2021/22 (c) e 2022/23 (e). A interação entre fonte x dose no acumulado de CO<sub>2</sub> (g m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup>) durante o período de quantificação na soja, safras 2020/21 (b), 2021/22 (d) e 2022/23 (f).



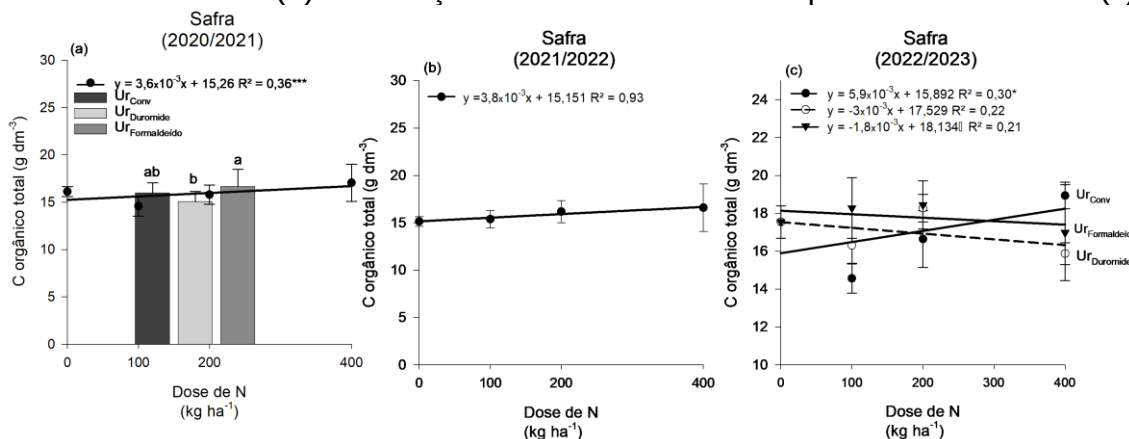
As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ). \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

### 1.3.3 Carbono no solo

As concentrações de COT variaram de acordo com as fontes e doses aplicadas. No primeiro ano avaliado, o teor aumentou com as doses linearmente

(17,06 g dm<sup>-3</sup>), a fonte que apresentou maior concentração foi a Ur<sub>Formaldeído</sub> (16,64 g dm<sup>-3</sup>) não diferindo da Ur<sub>Conv</sub> (15,97 g dm<sup>-3</sup>) e diferindo da Ur<sub>Duromide</sub> (15,05 g dm<sup>-3</sup>) (Figura 5 a). No segundo ano a resposta foi linear para doses com a dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> com a concentração de 16,59 g dm<sup>-3</sup> (Figura 5 b). No terceiro ano houve interação entre fontes e doses, sendo a resposta para as três fontes lineares, sendo a Ur<sub>Conv</sub> apresentando resposta positiva com a maior concentração dose de 400 kg ha<sup>-1</sup> (18,93 g dm<sup>-3</sup>), as fontes Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>formaldeído</sub> apresentaram equação linear negativa, sendo os valores mínimos encontrados nas maiores doses 15,87 e 16,97 g dm<sup>-3</sup>, respectivamente (Figura 5 c).

Figura 5 Carbono Orgânico total no solo, afetado pelas fontes e doses de fertilizantes nitrogenados após a safra 2020/21 (a), efeito das doses de N após a safra 2021/22 (b) e interação entre fontes e doses após a safra 2022/23 (c).



As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ). \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

## 1.4 Discussão

### 1.4.1 Volatilização da amônia

As perdas por volatilização de N-NH<sub>3</sub> foram maiores com aumento da umidade do solo (Figura 1), o segundo e terceiro ano de avaliação havia umidade no solo, provenientes de chuvas em dias anteriores, e acelerando o processo de hidrólise da urease. A hidrólise da ureia catalisada pela enzima urease, é um processo rápido nos solos, e envolve o consumo de prótons H<sup>+</sup>, aumentando o pH do solo na área circundante dos grânulos de fertilizante (Ernst; Massey, 1960, 1960; Terman, 1980). A hidrólise da ureia resulta na produção de amônia e CO<sub>2</sub>, de acordo com a seguinte

equação simplificada descrita por (Cantarella *et al.*, 2018):  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ . Como a hidrólise da ureia consome prótons ( $\text{H}^+$ ), o pH do solo aumenta, levando o equilíbrio entre  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NH}_3$  à formação da forma gasosa. Em condições de solo seco, a taxa de hidrólise da urease é baixa; no entanto, a taxa aumenta à medida que o teor de água do solo aumenta (Sahrawat, 1984). Acima de 20% de umidade, a hidrólise praticamente não é mais afetada pelas mudanças na umidade do solo (Cantarella *et al.*, 2018). As considerações anteriores explicam o comportamento sigmoidal das perdas por volatilização de  $\text{N-NH}_3$  (Vale; Sousa; Scivittaro, 2014).

As perdas pelo fertilizante  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  eram esperadas, sendo amplamente estudado, recentemente por Cassimiro *et al.* (2020, 2023) e Meirelles *et al.* (2022), em estudos com aplicação de ureia em pastagem sob condições similares ao deste estudo obtiveram valores entre 20 e 40% de perda, Cassim *et al.* (2022) na cultura do milho em solo arenoso, estimou perdas de 46% por volatilização da  $\text{N-NH}_3$ . Junta-se o fato de o fertilizante ter baixo custo e a sua alta perda de volatilização, fazendo da ureia o modelo de comparação para as novas tecnologias.

A  $\text{ur}_{\text{duromide}}$  um estabilizador que combina duas moléculas, NBPT e Duromide, ambas inibindo a atividade da enzima urease, obtendo a vantagem de uma estrutura química mais estável em condições de baixo pH e alta temperatura do solo (Cassim *et al.*, 2021). Isso permite maior eficiência na redução das perdas da  $\text{N-NH}_3$  em comparação a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$ , no primeiro ano de avaliação a redução chegou a 69% na dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 2), entretanto, esse alto desempenho não se repetiu ao longo dos anos, reduzindo em média 52% do primeiro ano para 46% no segundo, e chegando a 5% de redução comparada a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  no terceiro ano. Essa perda de eficiência pode estar ligada a ILP que frisa em deixar o solo sempre coberto pela cultura anterior. Pan *et al.* (2016) relata em condições com grandes quantidades de palha na superfície do solo, a quantidade de enzima urease no solo será maior, aumentando as perdas por volatilização de  $\text{N-NH}_3$  em até 25,5%. Ou seja, os estabilizadores são capazes de reduzir, mas não de eliminar a atividade da enzima urease, possivelmente devido às altas quantidades dessa enzima em sistemas com grandes quantidades de palha. Por essa razão, Cassim *et al.* (2022) concluíram que essa tecnologia não é a mais adequada para ambientes onde há grandes quantidades de resíduos de palha na superfície do solo.

A disponibilidade de N da  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  (fertilizante de liberação lenta) depende da decomposição das cadeias poliméricas ureia-aldeído em  $CO_2$  e  $NH_4^+$  pela atividade microbológica, e pelas propriedades do solo e fatores ambientais, como teor de argila, pH, umidade e temperatura, afetando a decomposição e a liberação de N (Guelfi, 2017; Jahns; Ewen; Kaltwasser, 2003). Embora a  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  possa reduzir a solubilidade das frações de N por meio da síntese de grupos de metileno ureia, ele contém alguma ureia que não reage com o formaldeído, favorecendo as perdas por volatilização de  $N-NH_3$ , mesmo em pequenas proporções (Cassim *et al.*, 2022). Da mesma forma que a  $Ur_{\text{Duromide}}$ , a  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  perdeu a eficiência ao passar dos anos, entretanto, a diferença é menor (Tabela 2), a redução em comparação a ureia foi de 57% no primeiro ano para 50% e 45% nos anos seguintes, demonstrando ser um fertilizante mais eficaz em sistema onde se deixa a palhada para cobertura do solo. Além desses fatores as baixas temperaturas, precipitações (Figura 1 d, h, l), MOS (Tabela 1, Figura 5 a, b) podem ter influenciado para baixa volatilização da  $Ur_{\text{Formaldeído}}$ .

Outro fator a ser observado é o aumento das doses não proporcionar correlação positiva, ou seja, aumentando as doses de N houve redução no percentual das perdas de  $N-NH_3$ . Esse comportamento é resultado da maior saturação com N dos locais onde a enzima urease atua (Minato *et al.*, 2019). Por exemplo, Silva *et al.* (2017) e Minato *et al.*, (2019) mostraram que para cada unidade de N adicionada ao solo utilizando ureia como fonte, a volatilização de  $N-NH_3$  foi reduzida em 1,4 e 0,22%, respectivamente. O resultado é justificado também, por se tratar de um solo de textura arenosa com baixos teores de MOS, o que facilita a saturação por N.

#### 1.4.2 Dióxido de Carbono

Os resultados obtidos nos três anos de experimentos em ambas as culturas estabelecidas (Figuras 3, 4), os resultados vão de encontro com os de (Aukema *et al.*, 2023; Brito *et al.*, 2015; Corrêa *et al.*, 2021; Raposo *et al.*, 2020), em experimentos em pastagens sob sistema ILP ou não, observaram que as emissões de  $CO_2$  variavam dependendo da temperatura do solo e da precipitação, com emissões mais altas no verão e mais baixas no inverno. De acordo com (Moreira; Siqueira, 2006), fatores bióticos e abióticos do solo, como suprimento de substrato, temperatura, umidade, oxigênio, N, textura e pH, afetam a produção de  $CO_2$  pelas raízes e organismos e, conseqüentemente, a troca gasosa entre o solo e a atmosfera. Além disso, adubação

com N é uma prática que aumenta a atividade microbiana do solo, e a subsequente entrada de água no solo por meio da precipitação favorece o deslocamento de gases no solo e promove a liberação de CO<sub>2</sub> (Corrêa *et al.*, 2021; Moreira; Siqueira, 2006).

Outro fator que pode aumentar as emissões de CO<sub>2</sub> é a estação de crescimento mais longa nas regiões tropicais e a maior eficiência fotossintética das plantas C<sub>4</sub>, levando ao aumento do rendimento e da área radicular da forragem e da respiração microbiana. Além disso, as gramíneas nos ecossistemas de pastagem têm sistemas radiculares densos que favorecem a atividade biológica e aumentam os fluxos de CO<sub>2</sub> (Brito *et al.*, 2015; Cardoso *et al.*, 2017). Vários estudos relataram que altos níveis de N mineral promovem a decomposição de resíduos de plantas e da MO do solo (Neff *et al.*, 2002; Potthoff *et al.*, 2005), consequentemente estimulando o fluxo de CO<sub>2</sub> (Raposo *et al.*, 2020).

A fertilização com N altera a biomassa acima e abaixo do solo das plantas, a biomassa microbiana do solo, a quantidade e a qualidade da palha e o C do solo (Hernández *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2016). Picos maiores de CO<sub>2</sub> são observados nas estações de crescimento após as aplicações de N, e a respiração diminui com o tempo à medida que o nutriente é consumido pelas raízes das plantas e pelos microrganismos (Luo *et al.*, 2016).

Os resultados observados no primeiro e terceiro ano de avaliações nos fertilizantes na pastagem (Figura 3b, f), vão de acordo com os encontrados por Dupas *et al.*, (2016), que aumentar as doses de N com Ur<sub>Conv</sub> obtiveram resposta quadrática no acúmulo de emissões de CO<sub>2</sub>. Em contraste Raposo *et al.* (2020); Zhu *et al.* (2016), não observaram a resposta para doses encontradas neste estudo. Os autores relatam as maiores emissões na dose mais baixa e poderia estar relacionado à baixa qualidade da matéria orgânica, às baixas temperaturas e à relação C/N. Além disso a fonte Ur<sub>Formaldeído</sub> obteve as menores emissões, devido à sua liberação lenta do N, enquanto que as fontes Ur<sub>Conv</sub> e Ur<sub>Duromide</sub> pela sua ação com a urease não diferenciaram. O segundo ano de experimento (Figura 3d) não apresentou o mesmo comportamento possivelmente pelas condições climáticas (Figura 1 h), pouca precipitação e baixas temperaturas, não favorecendo o desenvolvimento da gramínea.

As interações entre fontes x doses observadas (figura 4 b, d, f) podem estar relacionadas ao desenvolvimento da pastagem e soja, para Fang *et al.* (2012) a adição de N ao solo afeta os fluxos de CO<sub>2</sub> ao alterar o crescimento das plantas e renovar as reservas de C do solo. A fertilização com N provavelmente altera as principais vias

relacionadas aos fluxos de  $\text{CO}_2$ , pois também aumenta o acúmulo de forragem (Corrêa *et al.*, 2021) portanto, a resposta dos fluxos de  $\text{CO}_2$  ao N é consistente com a das plantas. Alternativamente, a fertilização com N estimula a respiração heterotrófica por meio da alta disponibilidade de C e N no substrato e do aumento da biomassa e da atividade microbiana (Song *et al.*, 2017; Tian *et al.*, 2015). As emissões pela  $\text{Ur}_{\text{Formaldeído}}$  não se adequaram a um modelo matemático, entretanto, a  $\text{Ur}_{\text{Conv}}$  e  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  sim, sendo a ureia respondendo linearmente as emissões na soja e a  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$  uma quadrática negativa, podendo ter relação as menores perdas por volatilização de  $\text{N-NH}_3$  (Figura 1) discutidas anteriormente, essa diferença pode estar atrelada aos efeitos do NBPT + Duromide contido na  $\text{Ur}_{\text{Duromide}}$ , podendo ficar no sistema e interagindo com C do solo.

Os eventos de precipitação determinam as variações sazonais nos fluxos de  $\text{CO}_2$ ; assim, o aumento das emissões de  $\text{CO}_2$  no verão está relacionado ao aumento da umidade do solo, o que aumenta a respiração das raízes devido ao crescimento das plantas e à atividade microbiana envolvida na decomposição da MO lábil no solo (Epron *et al.*, 2006; Lal, 2009).

#### 1.4.3 Carbono orgânico do solo

As maiores quantidades de COT (figura 5 a, b, c) estão alinhadas as emissões de  $\text{CO}_2$  (Figura 4 b, d, f), essa similaridade também foi observada por Aukema *et al.*, (2023) estudando soja no sistema ILP. Além disso, o aumento do COT no tratamento controle (sem N), de  $16,13 \text{ g dm}^{-3}$  no primeiro ano de experimento para  $17,54 \text{ g dm}^{-3}$  no terceiro pode ser reflexo da ILP, e de entradas adicionais de C durante a fase perene da rotação, já que o C acima do solo foi maior nessa fase do sistema (Aukema *et al.*, 2023). Embora a capacidade das culturas de cobertura de aumentar o C do solo seja altamente variável (Koudahe; Allen; Djaman, 2022), sua presença na rotação como plantas perenes pode favorecer o acúmulo de C (Ledo *et al.*, 2020). Descobriu-se que a respiração do solo está fortemente correlacionada com vários reservatórios de carbono do solo, incluindo o COT (Wang *et al.*, 2003).

Estudos relatam o aumento do COT com aplicação de fertilizantes, Bettio *et al.* (2022); Oliveira *et al.*, (2016), em ILP identificaram maiores teores com aplicação de diferentes fertilizantes comparados a sem aplicação. O efeito de fertilizantes químicos sobre o COT pode estar associado a melhoria na estrutura do solo, que pode proteger

o COT contra perdas (Oliveira *et al.*, 2003), e/ou a um aumento no crescimento das plantas com subsequente retorno de C ao solo, aumentando assim o COT (Poozesh *et al.*, 2010). O pasto que estava sendo cultivado pode ter promovido a exsudação de compostos orgânicos pelas raízes, servindo como fonte de energia para os microrganismos (Bansal; Chakraborty; Kumar, 2022). Além disso a fertilização com N reduz a respiração microbiana e a decomposição da MOS e aumenta a eficiência do uso do C microbiano quando o N adicionado está em altas proporções em relação ao N total do solo (Ramirez; Craine; Fierer, 2010; Zang; Wang; Kuzyakov, 2016).

Assim como o aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, Dupas *et al.*, (2016) relata o aumento da COT com acréscimo nas doses de Ur<sub>Conv</sub>, semelhante ao desse estudo, entretanto não há estudos relacionando Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>Formaldeído</sub> com COT e CO<sub>2</sub>, demonstrando a necessidade de maiores investigações sobre o tema.

## 1.5 Conclusão

As perdas por volatilização de N-NH<sub>3</sub>, foram maiores com Ur<sub>Conv</sub>, e reduzidas no uso de fertilizantes Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>Formaldeído</sub>, nos primeiros anos de estudo, entretanto, a eficiência da Ur<sub>Duromide</sub> foi reduzindo ao longo do tempo, evidenciando possíveis adversidades do produto com a palha deixada pelo sistema ILP. Em contrapartida a Ur<sub>Formaldeído</sub>, pouco oscilou durante os anos mostrando-se eficaz para obtenção de uma agricultura mais limpa nos sistemas de ILP.

No período da pastagem, a aplicação dos fertilizantes nitrogenados, houve aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>, com o aumento das doses, as diferenças entre as fontes não foram tão expressivas quanto na volatilização, entretanto, a Ur<sub>Conv</sub> emitiu mais CO<sub>2</sub> comparado a Ur<sub>Formaldeído</sub>, a Ur<sub>Duromide</sub>, não diferenciou das duas fontes. Na cultura da soja, com o aumento das temperaturas, houve interação entre as fontes e doses, e novamente a Ur<sub>Conv</sub> emitiu maiores concentrações de CO<sub>2</sub>, seguidas pela Ur<sub>Formaldeído</sub>, e a Ur<sub>Duromide</sub> com resposta positiva, com aumento das doses houve diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub>.

As concentrações de COT foram semelhantes aos da emissão de CO<sub>2</sub>, a Ur<sub>Conv</sub> apresentou maiores concentrações, seguido de Ur<sub>Formaldeído</sub> e Ur<sub>Duromide</sub>. Portanto conclui-se que o uso de tecnologia para aumento da eficiência nos fertilizantes nitrogenados, apresentaram resultados promissores na diminuição dos gases do efeito estufa, sendo uma boa opção em relação a Ur<sub>Conv</sub>.

## REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974. Disponível em:

<https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; PAULO CESAR SENTELHAS; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

ARAÚJO, E. da S.; MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; SOARES, L. H. de B.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 7, p. 769–776, 2009. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000700018>

AUKEMA, K. D.; WALLAU, M. O.; FAUST, D. R.; ARCHER, D. W.; HENDRICKSON, J. R.; KRONBERG, S. L.; LIEBIG, M. A. Soil CO<sub>2</sub> efflux dynamics in an integrated crop–livestock system. **Soil Science Society of America Journal**, v. 87, n. 4, p. 948–962, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20546>

AWALE, R.; CHATTERJEE, A. Enhanced Efficiency Nitrogen Products Influence Ammonia Volatilization and Nitrous Oxide Emission from Two Contrasting Soils. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 47–57, 2017. Disponível em:

<https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0219>

BANSAL, S.; CHAKRABORTY, P.; KUMAR, S. Crop–livestock integration enhanced soil aggregate-associated carbon and nitrogen, and phospholipid fatty acid. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 2781, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-06560-6>

BETTIO, D. P.; ARAUJO, A. S. F.; BONIFACIO, A.; ARAUJO, F. F. D. Soil microbial biomass, organic C, and soybean physiology in integrated crop–livestock systems with different inputs. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 7, p. 971–983, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1864341>

BONAUDO, T.; BENDAHAN, A. B.; SABATIER, R.; RYSCHAWY, J.; BELLON, S.; LEGER, F.; MAGDA, D.; TICHIT, M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. **European Journal of Agronomy**, v. 57, Integrated crop–livestock, p. 43–51, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>

BOWER, C. E.; HOLM-HANSEN, T. A Salicylate–Hypochlorite Method for Determining Ammonia in Seawater. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 37, n. 5, p. 794–798, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/f80-106>

BRITO, L. F.; AZENHA, M. V.; JANUSCKIEWICZ, E. R.; CARDOSO, A. S.; MORGADO, E. S.; MALHEIROS, E. B.; LA SCALA JR., N.; REIS, R. A.; RUGGIERI, A. C. Seasonal Fluctuation of Soil Carbon Dioxide Emission in Differently Managed Pastures. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 3, p. 957–962, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0480>

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. de B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, Biotechnological and medical relevance of ureases, p. 19–27, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>

CARDOSO, A. da S.; BRITO, L. de F.; JANUSCKIEWICZ, E. R.; MORGADO, E. da S.; BARBERO, R. P.; KOSCHECK, J. F. W.; REIS, R. A.; RUGGIERI, A. C. Impact of Grazing Intensity and Seasons on Greenhouse Gas Emissions in Tropical Grassland. **Ecosystems**, v. 20, n. 4, p. 845–859, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0065-0>

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. [S. l.]: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016.

CASSIM, B. M. A. R.; BESEN, M. R.; KACHINSKI, W. D.; MACON, C. R.; DE ALMEIDA JUNIOR, J. H. V.; SAKURADA, R.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Nitrogen Fertilizers Technologies for Corn in Two Yield Environments in South Brazil. **Plants**, v. 11, n. 14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11141890>

CASSIM, B. M. A. R.; KACHINSKI, W. D.; BESEN, M. R.; CONEGLIAN, C. F.; MACON, C. R.; PASCHOETO, G. F.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Duromide increase NBPT efficiency in reducing ammonia volatilization loss from urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210017>. Acesso em: 13 out. 2021.

CASSIM, B.; MACHADO, A.; FORTUNE, D.; MOREIRA, F.; ZAMPAR, É.; BATISTA, M. Effects of Foliar Application of Urea and Urea-Formaldehyde/Triazone on Soybean and Corn Crops. **Agronomy**, v. 10, p. 1549, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10101549>

CASSIMIRO, J. B.; DE OLIVEIRA, C. L. B.; BONI, A. D. S.; DONATO, N. D. L.; MEIRELLES, G. C.; DA SILVA, J. F.; RIBEIRO, I. V.; HEINRICHS, R. Ammonia

Volatilization and Marandu Grass Production in Response to Enhanced-Efficiency Nitrogen Fertilizers. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 837, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030837>

CASSIMIRO, J. B.; ROCHETTI, A. C. A.; HEINRICHS, R.; CASTILLO, E. O. F. Volatilização da amônia e avaliação do capim-marandu sob doses e fontes de fertilizantes nitrogenados. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e526985823–e526985823, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5823>

CORRÊA, D. C. D. C.; CARDOSO, A. D. S.; FERREIRA, M. R.; SINISCALCHI, D.; TONIELLO, A. D.; LIMA, G. C. D.; REIS, R. A.; RUGGIERI, A. C. Are CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, and N<sub>2</sub>O Emissions from Soil Affected by the Sources and Doses of N in Warm-Season Pasture? **Atmosphere**, v. 12, n. 6, p. 697, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos12060697>

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A. S.; BARBERO, R. P.; LEITE, R. G.; ROMANZINI, E. P.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. **Diagnóstico das Pastagens no Brasil**, p. 38, 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/277583830\\_Diagnostico\\_das\\_pastagens\\_no\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/277583830_Diagnostico_das_pastagens_no_Brasil)

DUPAS, E.; BUZETTI, S.; RABÊLO, F. H. S.; SARTO, A. L. Carbon and carbon dioxide accumulation by marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation. **Revista Ceres**, v. 63, n. 3, p. 387–393, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663030016>

E SILVA, J. A. G. *et al.* Integrated systems improve the sustainability of soybean cultivation in the tropical region. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1224530>

EMBRAPA. **ILPF em Número**. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158636/1/2016-cpamt-ilpf-em-numeros.pdf>. Acesso em: 8 set. 2023.

EPRON, D.; BOSCH, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, v. 22, n. 5, p. 565–574, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0266467406003415>

ERNST, J. W.; MASSEY, H. F. The Effects of Several Factors on Volatilization of Ammonia Formed from Urea in the Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 24, n. 2, p. 87–90, 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400020007x>

FANG, H.; CHENG, S.; YU, G.; ZHENG, J.; ZHANG, P.; XU, M.; LI, Y.; YANG, X. Responses of CO<sub>2</sub> efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition. **Plant and Soil**, v. 351, n. 1, p. 177–190, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0942-4>

FAO. Global Soil Laboratory Network. Standard operating procedure for soil calcium carbonate equivalent. Volumetric Calcimeter method. 2021. Disponível em:

<https://www.fao.org/3/ca8620en/ca8620en.pdf>

FRANZLUEBBERS, A. J. Integrated Crop–Livestock Systems in the Southeastern USA. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 2, p. 361–372, 2007. Disponível em:

<https://doi.org/10.2134/agronj2006.0076>

GORH, D.; BARUAH, K. K. Estimation of methane and nitrous oxide emission from wetland rice paddies with reference to global warming potential. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 16, p. 16331–16344, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05026-z>

GUELF, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 157, p. 1-14, 2017.

HERNÁNDEZ, E.; QUESTAD, E. J.; MEYER, W. M.; SUDING, K. N. The effects of nitrogen deposition and invasion on litter fuel quality and decomposition in a *Stipa pulchra* grassland. **Journal of Arid Environments**, v. 162, p. 35–44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.11.003>

JAHS, T.; EWEN, H.; KALTWASSER, H. Biodegradability of Urea-Aldehyde Condensation Products. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 11, n. 4, p. 155–159, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1026052314695>

JANSSENS, I. A.; KOWALSKI, A. S.; LONGDOZ, B.; CEULEMANS, R. Assessing forest soil CO<sub>2</sub> efflux: an in situ comparison of four techniques. **Tree Physiology**, v. 20, n. 1, p. 23–32, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephys/20.1.23>

KOUDAHE, K.; ALLEN, S. C.; DJAMAN, K. Critical review of the impact of cover crops on soil properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 343–354, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01114.x>

LEDO, A. *et al.* Changes in soil organic carbon under perennial crops. **Global Change Biology**, v. 26, n. 7, p. 4158–4168, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.15120>

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. de F.; DEDIEU, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, Integrated Crop-Livestock System Impacts on Environmental Processes, p. 4–8, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

LIU, K.; SOLLENBERGER, L. E.; SILVEIRA, M. L.; VENDRAMINI, J. M. B.; NEWMAN, Y. C. Grazing Intensity and Nitrogen Fertilization Affect Litter Responses in ‘Tifton 85’ Bermudagrass Pastures: II. Decomposition and Nitrogen Mineralization. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 1, p. 163–168, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0320>

LIU, X. *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China. **Nature**, v. 494, n. 7438, p. 459–462, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature11917>

LORENTZ, J. F.; CALIJURI, M. L.; ASSEMANY, P. P.; ALVES, W. S.; PEREIRA, O. G. Microalgal biomass as a biofertilizer for pasture cultivation: Plant productivity and chemical composition. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124130, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124130>

LUO, Q.; GONG, J.; ZHAI, Z.; PAN, Y.; LIU, M.; XU, S.; WANG, Y.; YANG, L.; BAOYIN, T. The responses of soil respiration to nitrogen addition in a temperate grassland in northern China. **Science of The Total Environment**, v. 569–570, p. 1466–1477, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.237>

MEIRELLES, G. C.; HEINRICH, R.; LIRA, M.; RIBEIRO VIRGÍLIO, I.; FELIPE MELO DOS SANTOS, L.; BONFIM CASSIMIRO, J.; LUIS RUFFO, M.; VIEGA SOARES FILHO, C.; MOREIRA, A. Ammonia volatilization and pasture yield of *Urochloa decumbens* fertilized with nitrogen sources. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2129049>

MEISSER, M.; VITRA, A.; DELÉGLISE, C.; DUBOIS, S.; PROBO, M.; MOSIMANN, E.; BUTTLER, A.; MARIOTTE, P. Nutrient limitations induced by drought affect forage N and P differently in two permanent grasslands. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 280, p. 85–94, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.027>

MILAM-GUERRERO, J.; YANG, B.; TO, D. T.; MYUNG, N. V. Nitrous Oxide Is No Laughing Matter: A Historical Review of Nitrous Oxide Gas-Sensing Capabilities Highlighting the Need for Further Exploration. **ACS sensors**, v. 7, n. 12, p. 3598–3610, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c01275>

MINATO, E. A. *et al.* Controlled-release nitrogen fertilizers: characterization, ammonia volatilization, and effects on second-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190108>. Acesso em: 26 out. 2020.

MINATO, E. A.; BESEN, M. R.; CASSIM, B. M. A. R.; MAZZI, F. L.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Modeling of Nitrogen Losses Through Ammonia Volatilization in Second-season Corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 50, n. 21, p. 2733–2741, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1678631>

MOREIRA, F. M. D. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006.  
NEFF, J. C.; TOWNSEND, A. R.; GLEIXNER, G.; LEHMAN, S. J.; TURNBULL, J.; BOWMAN, W. D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. **Nature**, v. 419, n. 6910, p. 915–917, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature01136>

OLIVEIRA, C. L. B. de; CASSIMIRO, J. B.; LIRA, M. V. da S.; BONI, A. da S.; DONATO, N. de L.; REIS, R. dos A.; HEINRICHS, R. Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2817, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>

OLIVEIRA, W. R. D. de; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M. de; COSER, T. R.; SILVA, A. M. M.; LACERDA, M. M.; SOUZA, K. W.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1501–1510, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900049>

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. de; CORSI, M. Liming and fertilization to restore degraded *Brachiaria decumbens*

pastures grown on an entisol. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 125–131, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000100019>

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283–289, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009, 2009.

POOZESH, V.; CASTILLON, P.; CRUZ, P.; BERTONI, G. Re-evaluation of the liming-fertilization interaction in grasslands on poor and acid soils. **Grass and Forage Science**, v. 65, n. 2, p. 260–272, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00744.x>

POTTHOFF, M.; DYCKMANS, J.; FLESSA, H.; MUHS, A.; BEESE, F.; JOERGENSEN, R. G. Dynamics of maize (*Zea mays* L.) leaf straw mineralization as affected by the presence of soil and the availability of nitrogen. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, n. 7, p. 1259–1266, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.11.022>

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, Â. M. C. *Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo*. n. 2nd, p. 88, 1997.

RAMIREZ, K. S.; CRAINE, J. M.; FIERER, N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2336–2338, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.032>

RAPOSO, E. *et al.* Greenhouse gases emissions from tropical grasslands affected by nitrogen fertilizer management. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 6, p. 4666–4680, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20385>  
REETZ, H. F. **Fertilizers and their efficient use**. Paris: International Fertilizer industry Association, IFA, 2016.

SAHRAWAT, K. L. Effects of temperature and moisture on urease activity in semi-arid tropical soils. **Plant and Soil**, v. 78, n. 3, p. 401–408, 1984. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02450373>

SANTOS, H. dos; JACOMINE, P.; ANJOS, L.; OLIVEIRA, V.; LUMBRERAS, J.; COELHO, M.; ALMEIDA, J.; CUNHA, T.; OLIVEIRA, J. **Embrapa: Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SAS®. **SAS OnDemand for Academics**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://welcome.oda.sas.com/home>. Acesso em: 9 fev. 2022.

SEBER, G. A.; WILD, C. J. Nonlinear regression. hoboken. **New Jersey: John Wiley & Sons**, v. 62, n. 63, p. 1238, 2003.

SEKARAN, U.; KUMAR, S.; LUIS GONZALEZ-HERNANDEZ, J. Integration of crop and livestock enhanced soil biochemical properties and microbial community structure. **Geoderma**, v. 381, p. 114686, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114686>

SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: A Meta-Analysis. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 1, p. 1–13, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.04.0200>

SILVA, Y. F.; VALADARES, R. V.; DIAS, H. B.; CUADRA, S. V.; CAMPBELL, E. E.; LAMPARELLI, R. A. C.; MORO, E.; BATTISTI, R.; ALVES, M. R.; MAGALHÃES, P. S. G.; FIGUEIREDO, G. K. D. A. Intense Pasture Management in Brazil in an Integrated Crop-Livestock System Simulated by the DayCent Model. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3517, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14063517>

SOIL SURVEY DIVISION. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th. ed. Washinton, D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

SONG, L.; TIAN, P.; ZHANG, J.; JIN, G. Effects of three years of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen dynamics and greenhouse gas emissions in a Korean pine plantation of northeast China. **Science of The Total Environment**, v. 609, p. 1303–1311, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.017>

SUN, Q.; WANG, R.; WANG, Y.; DU, L.; ZHAO, M.; GAO, X.; HU, Y.; GUO, S. Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: Does soil initial fertility matter? **Geoderma**, v. 325, p. 172–182, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.04.001>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: [https://grupos.moodle.ufsc.br/pluginfile.php/474835/mod\\_resource/content/0/Fisiologia%20e%20desenvolvimento%20vegetal%20-%20Zair%206%C2%AAed.pdf](https://grupos.moodle.ufsc.br/pluginfile.php/474835/mod_resource/content/0/Fisiologia%20e%20desenvolvimento%20vegetal%20-%20Zair%206%C2%AAed.pdf). Acesso em: 26 jan. 2022.

TERMAN, G. L. Volatilization Losses of Nitrogen as Ammonia from Surface-Applied Fertilizers, Organic Amendments, and Crop Residues. *In: Advances in Agronomy*. [S. l.]: Elsevier, 1980. v. 31, p. 189–223. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60140-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60140-6). Acesso em: 5 set. 2023.

TI, C.; HAN, X.; CHANG, S. X.; PENG, L.; XIA, L.; YAN, X. Mitigation of agricultural NH<sub>3</sub> emissions reduces PM<sub>2.5</sub> pollution in China: A finer scale analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, p. 131507, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131507>

TIAN, Z.; WANG, J. J.; LIU, S.; ZHANG, Z.; DODLA, S. K.; MYERS, G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of The Total Environment**, v. 533, p. 329–338, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.147>

VALE, M. L. C. D.; SOUSA, R. O. D.; SCIVITTARO, W. B. Evaluation of ammonia volatilization losses by adjusted parameters of a logistic function. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 223–231, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100022>

WANG, W. J.; DALAL, R. C.; MOODY, P. W.; SMITH, C. J. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 2, p. 273–284, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00274-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00274-2)

WOODLEY, A. L.; DRURY, C. F.; YANG, X. Y.; PHILLIPS, L. A.; REYNOLDS, D. W.; CALDER, W.; OLOYA, T. O. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 4, p. 1327–1341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20079>

ZANG, H.; WANG, J.; KUZUYAKOV, Y. N fertilization decreases soil organic matter decomposition in the rhizosphere. **Applied Soil Ecology**, v. 108, p. 47–53, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2016.07.021>

ZHU, C.; MA, Y.; WU, H.; SUN, T.; LA PIERRE, K. J.; SUN, Z.; YU, Q. Divergent Effects of Nitrogen Addition on Soil Respiration in a Semiarid Grassland. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 33541, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep33541>

## RESUMO

### **Otimização da produtividade da soja em solos arenosos com uso de fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada na integração lavoura-pecuária**

A produção de soja em solos arenosos pode ser muito arriscada, isso está relacionado à baixa capacidade de armazenamento de água no solo, à menor fertilidade do solo e aos baixos teores de nitrogênio. Os benefícios da adoção do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) sob plantio direto como uma estratégia para a intensificação sustentável da produção agrícola em regiões tropicais e subtropicais, aumentando a produção de alimentos. No entanto, pouco se sabe sobre a adubação de sistemas, o uso de N na pastagem e os benefícios deixados para cultura seguinte. O objetivo foi avaliar a eficiência dos fertilizantes ureia ( $Ur_{Conv}$ ), ureia NBPT + Duromide ( $Ur_{Duromide}$ ) e ureia formaldeído ( $Ur_{Formaldeído}$ ), na produção e qualidade da pastagem e o efeito residual no sistema para a produtividade e estado nutricional da cultura da soja. As avaliações foram realizadas durante três anos agrícolas (2020-21, 2021-22 e 2022-23). A pastagem utilizada foi a *Urochloa Brizhanta* cv. *marandu* e a soja NS-6828 e NS-6700. O solo foi classificado como ARGISSOLO VERMELHO-AAMARELO distrofico com textura arenosa. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com quatro repetições em esquema fatorial 3x4. Os tratamentos foram constituídos por três fontes de N ( $Ur_{Conv}$ ,  $Ur_{Formaldeído}$ ,  $Ur_{Duromide}$ ), acrescidos de 4 doses (0, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N). A matéria seca (MS) e a proteína bruta total (PB<sub>Total</sub>) apresentaram comportamento semelhante, com resposta quadrática às doses de N. No primeiro corte, a ureia formaldeído apresentou os melhores resultados, com 2.664,5 kg ha<sup>-1</sup> de MS e 435,1 kg ha<sup>-1</sup> de PB<sub>Total</sub>, superior à ureia convencional. Nas três safras de soja (2020/21, 2021/22 e 2022/23), houve interação entre fontes e doses de N para a produtividade. Na primeira safra, a  $Ur_{Duromide}$  apresentou o melhor desempenho, com 4.944,9 kg ha<sup>-1</sup> de grãos na dose de 230,8 kg ha<sup>-1</sup> de N. Na segunda, as maiores produtividades ocorreram com 400 kg ha<sup>-1</sup> de N para  $Ur_{Duromide}$  (3.005,0 kg ha<sup>-1</sup>) e  $Ur_{Formaldeído}$  (3.255,4 kg ha<sup>-1</sup>). Na terceira, a  $Ur_{Formaldeído}$  atingiu 4.272,5 kg ha<sup>-1</sup> na dose de 247,5 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto a  $Ur_{Conv}$  alcançou 4.067,3 kg ha<sup>-1</sup> com 400 kg ha<sup>-1</sup>. A adubação nitrogenada favoreceu a

produção de grãos, destacando a importância do manejo adequado do N e da sincronização entre a liberação de nutrientes dos resíduos e a demanda da cultura subsequente.

**Palavras-chave:** Adubação nitrogenada; Ureia estabilizada; *Urochloa brizantha*, Resíduo vegetais.

## ABSTRACT

### **Optimization of soybean productivity in sandy soils using enhanced-efficiency nitrogen fertilizer in an integrated crop-livestock system**

Soybean production in sandy soils can be highly challenging due to the low water-holding capacity, lower soil fertility, and low nitrogen availability. The benefits of adopting integrated crop-livestock systems (ICLS) under no-tillage as a strategy for the sustainable intensification of agricultural production in tropical and subtropical regions include increased food production. However, little is known about system fertilization, the use of N in pasture, and the benefits carried over to the subsequent crop. Therefore, this study aimed to evaluate the efficiency of urea fertilizers—conventional urea ( $Ur_{Conv}$ ), NBPT + Duromide-treated urea ( $Ur_{Duromide}$ ), and formaldehyde urea ( $Ur_{Formaldehyde}$ ) on pasture production and quality, as well as their residual effects on soybean productivity and nutritional status. The evaluations were conducted over three agricultural years (2020–2021, 2021–2022, and 2022–2023). The pasture used was *Urochloa brizantha* cv. *Marandu*, and the soybean cultivars were NS-6828 and NS-6700. The soil was classified as dystrophic Ultisol with a sandy texture. The experimental design consisted of randomized complete blocks with four replications in a  $3 \times 4$  factorial arrangements. Treatments consisted of three N sources ( $Ur_{Conv}$ ,  $Ur_{Formaldehyde}$ , and  $Ur_{Duromide}$ ) combined with four N rates (0, 100, 200, and 400 kg ha<sup>-1</sup>). Dry matter (DM) and total crude protein (CP) showed similar behavior, with a quadratic response to N rates. In the first cut, formaldehyde urea showed the best results, with 2,664.5 kg ha<sup>-1</sup> of DM and 435.1 kg ha<sup>-1</sup> of total CP, outperforming conventional urea. Across the three soybean growing seasons (2020/21, 2021/22, and 2022/23), an interaction between N sources and rates was observed for grain yield. In the first season,  $Ur_{Duromide}$  showed the best performance, with a yield of 4,944.9 kg ha<sup>-1</sup> at a rate of 230.8 kg ha<sup>-1</sup> of N. In the second season, the highest yields were obtained with 400 kg ha<sup>-1</sup> of N for  $Ur_{Duromide}$  (3,005.0 kg ha<sup>-1</sup>) and  $Ur_{Formaldehyde}$  (3,255.4 kg ha<sup>-1</sup>). In the third season,  $Ur_{Formaldehyde}$  reached 4,272.5 kg ha<sup>-1</sup> at a rate of 247.5 kg ha<sup>-1</sup>, while conventional urea reached 4,067.3 kg ha<sup>-1</sup> with 400 kg ha<sup>-1</sup>. N fertilization increased grain production, highlighting the importance of proper N management and

synchronizing nutrient release from residues with the nutrient demand of the subsequent crop.

**Key-words:** Nitrogen fertilization; Plant residues, Stabilized urea; *Urochloa brizantha*.

## CAPÍTULO II

### 2 OTIMIZAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SOLOS ARENOSOS COM USO DE FERTILIZANTE NITROGENADO DE EFICIÊNCIA AUMENTADA NA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

#### 2.1 Introdução

Estima-se que 735 milhões de pessoas no mundo enfrentaram a fome em 2022 (FAO, 2023). Isso inclui o acesso insuficiente a um suprimento equilibrado de macronutrientes (carboidratos, proteínas e gorduras), mas também a "fome oculta", ou seja, a falta ou a ingestão inadequada de micronutrientes, resultando em várias formas de desnutrição (FAO, 2023). A expansão populacional associada ao aumento da renda per capita exigirá o dobro da produção atual de alimentos até meados deste século (FAO, 2014; Mottet *et al.*, 2017). Historicamente, esse cenário representa um dos maiores desafios para o setor agrícola, pois esse aumento terá de ser alcançado sem a expansão de novas áreas com o mínimo de impacto ambiental (Moraes *et al.*, 2014; Simões *et al.* 2023).

A agricultura brasileira vem aumentando a produção de alimentos nos últimos anos, a fim de suprir as necessidades mundiais. Oliveira *et al.* (2023), atribui o aumento na produtividade, a aplicação de corretivos, fertilizante e ao uso de tecnologias. A soja, por exemplo, aumentou sua produtividade de 1126,6 kg ha<sup>-1</sup> em 1961 para 3445kg ha<sup>-1</sup> em 2021 (FAOSTAT, 2023). Entretanto, mesmo com acréscimo na produtividade, há necessidade de aumentar a produção de soja, estudo recente relatou que o Brasil pode ampliar a produção de soja em 66% até 2050, sem desmatamento, esse crescimento se daria em áreas com pastagens degradadas ou em processo de degradação (Branco *et al.*, 2021). Estima-se que somente no Brasil haja mais de 100 milhões de hectares de pastagens degradadas (Dias-Filho, 2014).

O monocultivo prevalece nas áreas brasileiras, sofrendo impactos nos processos de degradação, principalmente em áreas sobre solos arenosos. No mundo os solos arenosos representam 31% de toda a cobertura terrestre, 21% são cobertos por pastagens e 4% por agricultura (Huang; Hartemink, 2020). Portanto, haverá um

crescimento significativo na produção mundial de alimentos em solos arenosos nos próximos anos (Rebonatti *et al.*, 2023). No entanto, apenas 4% de todos os estudos de solo publicados em todo o mundo se concentraram em solos arenosos (Huang; Hartemink, 2020), o que explica a baixa exploração desses ambientes para a produção de alimentos. A produção de soja em solos arenosos pode ser muito arriscada, apresentando maior adequação em áreas convertidas de pastagens degradadas, isso está ligado à baixa capacidade de armazenamento de água no solo, à menor fertilidade e aos baixos teores de nitrogênio (Cordeiro; Echer, 2019).

Cenário esse que estimula a implantação de novas tecnologias para a recuperação de áreas degradadas e adoção de técnicas de produção simples e de potencialidade, como é o caso da integração lavoura-pecuária (ILP). A área cultivada no sistema ILP, representa 5% do total da pecuária e agricultura no Brasil, compreendendo uma média de 12,5 milhões de ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2016), representando uma oportunidade significativa para melhorar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Bonaudo *et al.*, 2014). Os serviços ecossistêmicos promovidos pelo sistema ILP têm sido relatados em diversos estudos (Franzluebbers; Sawchik; Taboada, 2014; Assmann *et al.*, 2015; Bonetti *et al.*, 2019; Simões *et al.*, 2023), destacando maior produção de grãos, melhor qualidade da água, maiores taxas de infiltração de água no solo e, conseqüentemente, redução dos riscos de erosão, além da manutenção da fertilidade do solo por meio de maior ciclagem de nutrientes.

No sistema de ILP a escolha por uma boa forrageira é fundamental, o uso da *Urochloa* para a produção de palha tem atraído o interesse de muitos agricultores e pesquisadores, com resultados satisfatórios em regiões tropicais (Moraes *et al.*, 2019; Mateus *et al.*, 2020; Crusciol *et al.*, 2021). Essas gramíneas são tolerantes à seca, têm sistemas radiculares profundos, produzem alta biomassa, reciclam nutrientes e mantêm a umidade do solo, promovendo assim melhores condições para o desenvolvimento das plantas na rotação de culturas (Costa *et al.*, 2020).

O conceito de Adubação de Sistemas tem como base a ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de um sistema de rotação buscando a máxima eficiência de uso de nutrientes, reduzindo entradas, evitando perdas e mantendo a fertilidade do solo a longo prazo (Assmann *et al.*, 2017). Se considerarmos o solo como um “sistema bancário”, onde se guarda os nutrientes, como descreve Novais *et al.*, (2007), podemos considerar a adubação de sistema como “fundo de investimento” no qual, a

cultura é favorecida pela adubação, e ainda há diversos benefícios para cultura seguinte.

O uso de fertilizantes nitrogenados em pastagem é amplamente estudado, o mais utilizado é a ureia ( $Ur_{Conv}$ ), entretanto, uma vez aplicada ao solo, a ureia é hidrolisada pela ação da enzima urease, produzindo amônia ( $N-NH_3$ ), que é rapidamente perdida para a atmosfera na forma de gás (Woodley *et al.*, 2020). Há novas tecnologias que prometem segurar o N no solo e consequentemente aumentar a produção, por exemplo, a nova tecnologia de estabilização Duromide + N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) reduziu as perdas de  $N-NH_3$  em 33% em comparação com apenas NBPT (Cassim *et al.*, 2021). Existem os fertilizantes de liberação lentas, de acordo com (Guelfi, 2017), são produtos da condensação da ureia com aldeídos para liberar o nutriente mais lentamente do que as fontes convencionais. Entre os mais usados está a ureia-formaldeído ( $Ur_{Formaldeído}$ ). Essa tecnologia necessita ser quebrada por enzimas ou organismos no solo para ficarem disponíveis para plantas. (Cardoso; Andreote, 2016; Reetz, 2016; Oliveira *et al.*, 2022). Segundo a (FAO, 2023), o uso de tecnologias contextualmente adequadas com inovações financeiras, sociais e institucionais complementares pode permitir a mitigação de compensações, em que uma inovação pode compensar os impactos negativos causados por outra.

Nossa hipótese é que os fertilizantes com tecnologia agregada, Ureia NBPT + Duromide e Ureia Formaldeído, possam aumentar a produção de matéria seca na pastagem e consequentemente segurar o nutriente no sistema e assim trazer benefícios a cultura da soja em sistema ILP. Nossos objetivos foram avaliar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada na produção e qualidade da *Urochloa Brizantha* cv. *marandu* e o efeito residual no sistema para a produtividade e estado nutricional da cultura da soja.

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 Área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido de maio de 2020 até março de 2023 (anos agrícolas 2020/21, 2021/22 e 2022/23) na Fazenda Experimental da UNOESTE em Presidente Bernardes (22°17'27" S; 51°40'51" W) a 385 m acima do nível do mar, estado de São Paulo, Brasil. O clima da região segundo a classificação de Köppen, é

classificado como Aw (Alvares *et al.*, 2013), os dados climáticos dos três anos de experimento estão apresentados na figura 1. O solo é classificado como ARGISSOLO VERMELHO Distroférico com textura arenosa (Santos *et al.*, 2018), correspondendo a um Ultisol distrofic (Soil Survey Division, 2014). As propriedades físicas e químicas do solo das camadas de 0,00 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m foram de acordo com Tedesco *et al.*, (2004) e Teixeira *et al.*, (2017), descritas na Tabela 1.

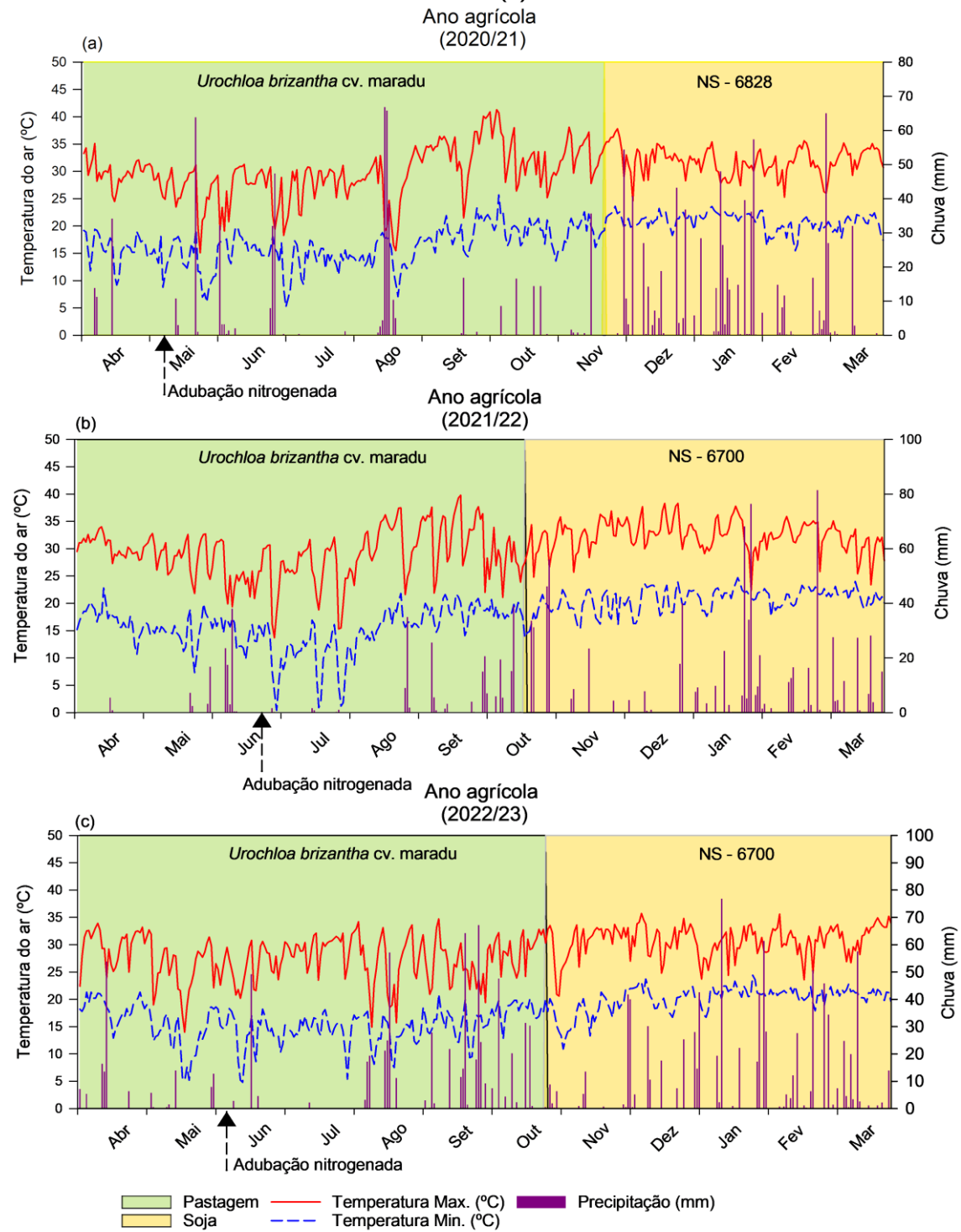
Tabela 4 Atributos físico e químicos do solo na instalação do experimento.  
Presidente Bernardes, 2020.

| Fertilizante Domiarco, 2020. |                               |                    |                     |                                               |                                |      |      |      |       |         |      |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|------|------|------|-------|---------|------|
| Camada<br>m                  | pH<br>CaCl <sub>2</sub>       | MO                 | P                   | K                                             | Ca                             | Mg   | Al   | H+Al | SB    | CT<br>C |      |
|                              |                               | g kg <sup>-1</sup> | mg dm <sup>-3</sup> | -----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----- |                                |      |      |      |       |         |      |
| 0-0,20                       | 4,80                          | 17,6               | 8,69                | 1,4                                           | 12,3                           | 8,1  | 0,2  | 38,5 | 21,8  | 60,3    |      |
| 0,20-<br>0,40                | 4,60                          | 10,1               | 2,37                | 1,7                                           | 6,5                            | 5,0  | 1    | 36   | 13,2  | 49,2    |      |
| Camada<br>m                  | Areia                         | Silte              | Argila              | V                                             | m                              | S    | B    | Cu   | Fe    | Mn      | Zn   |
|                              | -----g kg <sup>-1</sup> ----- |                    | -----%-----         |                                               | -----mg dm <sup>-3</sup> ----- |      |      |      |       |         |      |
|                              | --                            |                    |                     | -                                             |                                |      |      |      | ----- |         |      |
| 0-0,20                       | 79<br>6                       | 32                 | 172                 | 36,15                                         | 0,91                           | 2,97 | 0,10 | 0,96 | 180,6 | 52,1    | 2,16 |
| 0,20-<br>0,40                | 76<br>8                       | 32                 | 201                 | 26,83                                         | 7,04                           | 2,40 | 0,08 | 0,96 | 186,2 | 34,2    | 0,66 |

\*análise química do solo de acordo com Tedesco *et al.*, (2004), e textura do solo de acordo com Teixeira *et al.*, (2017). MO: matéria orgânica; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições em esquema fatorial 3x4. Os tratamentos foram constituídos por três fontes de N, uma de liberação imediata ureia convencional (Ur<sub>Conv</sub>, com 45% de N), outra liberação lenta ureia formaldeído (Ur<sub>Form</sub>, com 39% de N), e ureia estabilizada com inibidor de urease e tecnologia Duromide (Ur<sub>Duromide</sub>, com 45% de N), sendo que estas fontes foram aplicadas em doses crescentes de N (0, 100, 200, 400 kg ha<sup>-1</sup>). Após o perfilhamento da pastagem aplicou-se os fertilizantes nitrogenados a lanço. As parcelas foram compostas por 24,5 m<sup>2</sup>, sendo 3,5 m de largura por 7 m de comprimento.

Figura 6 Condições climáticas nos anos agrícolas 2020/21 (a), 2021/22 (b) e 2022/23 (c).



### 2.2.2 Sistema de Integração Lavoura-Pecuária e manejo do solo

A acidez do solo foi corrigida com aplicação de calcário dolomítico [CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] na dose 1.337 kg ha<sup>-1</sup> com PRNT de 72%, quantidade necessária para elevar o pH (CaCl<sub>2</sub>) a 5,5, conforme recomendado (Raij *et al.*, 1997). A calagem foi realizada em abril de 2020 na superfície do solo sem incorporação. A pastagem já estava estabelecida e houve a homogeneização da área para semeadura. A pastagem começou em maio/março de 2020, 2021 e 2022 e terminaram entre setembro e outubro (Tabela 2). A depender das condições climáticas a cultivar foi dessecada cerca de 30 dias antes da previsão da semeadura da soja, para isso foi utilizado herbicida Glyphosato (*N*-(fosfometil) glicina) na dose de 6 L ha<sup>-1</sup> com calda de 120 L ha<sup>-1</sup>.

A adubação de semeadura da soja foi realizada com 60 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 60 kg de K<sub>2</sub>O e 36 kg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> para todos os anos de cultivo (Tabela 2), e as fontes utilizadas foram superfosfato simples no sulco de semeadura e cloreto de potássio a lanço em área total. A semeadura foi realizada com distribuição de 14,9 sementes m<sup>-1</sup> com espaçamento de 0,45 m, totalizando 331.107 pl ha<sup>-1</sup>. As sementes foram tratadas com fungicida e inseticida, e inoculação com 60 mL *Bradyrhizobium japonicum* (nas três safras) e *Azospirillum* (duas safras finais) foi realizada por cobertura (spray na linha de plantio).

Tabela 5 Resumo das fases de pastagem e cultivo nos três anos de experimento.

| Pastagem                                           | Ano agrícola       |                    |                    |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                                    | 2020               | 2021               | 2022               |
| Período de ocupação <sup>1</sup>                   |                    |                    |                    |
| Começo (semeadura)                                 | 04 de abril        | 19 de abril        | 30 de março        |
| Fim (dessecação)                                   | 20 de outubro      | 1 de outubro       | 25 de setembro     |
| Dias de ocupação                                   | 200                | 166                | 208                |
| <i>Urochloa Brizantha</i>                          | cv. <i>marandu</i> | cv. <i>marandu</i> | cv. <i>marandu</i> |
| Taxa de semeadura (kg ha <sup>-1</sup> )           | 12                 | 12                 | 12                 |
| Adubação com Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> de N) | (100, 200 e 400)   | 100, 200 e 400)    | 100, 200 e 400)    |
| Safr                                               |                    |                    |                    |
| Cultivo                                            | Safr               |                    |                    |
|                                                    | 2020/2021          | 2021/2022          | 2022/2023          |
| Semeadura                                          | 23 de novembro     | 21 de outubro      | 27 de outubro      |
| Colheita                                           | 26 de março        | 30 de março        | 23 de março        |

|                                                                                           |                       |                                                |                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Dias de cultivo                                                                           | 124                   | 161                                            | 148                                            |
| Soja cultivar                                                                             | NS – 6828             | NS – 6700                                      | NS - 6700                                      |
| Taxa de semeadura (kg ha <sup>-1</sup> )                                                  | 65                    | 65                                             | 65                                             |
| Inoculação                                                                                | <i>Bradyrhizobium</i> | <i>Bradyrhizobium</i><br>e <i>Azospirillum</i> | <i>Bradyrhizobium</i><br>e <i>Azospirillum</i> |
| Adubação com Fósforo (kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sup>2</sup> | 60                    | 60                                             | 60                                             |
| Adubação com Potássio (kg ha <sup>-1</sup> de K <sub>2</sub> O) <sup>3</sup>              | 60                    | 60                                             | 60                                             |
| Adubação com Enxofre (kg ha <sup>-1</sup> de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) <sup>2</sup> | 36                    | 36                                             | 36                                             |

<sup>1</sup> simulação de pastejo, sem a presença animal, <sup>2</sup> Super simples (20% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 12% de S), <sup>3</sup> KCl (60% de K)

### 2.2.3 Análise da pastagem

A produção de matéria seca (PMS) foi mensurada por meio de medição de forragem, quando necessário, a média do melhor tratamento atingiu 28 cm de altura (95% de interceptação luminosa) (Corrêa, 2000). Usando uma estrutura retangular de ferro com 0,5 m<sup>2</sup> (1 x 0,5 m), disposta aleatoriamente em uma parte representativa de cada parcela, foi amostrada a uma altura de corte padronizada de 0,15 m. As amostras foram pesadas em uma estufa seca a 65°C até um peso constante (Silva; Queiroz, 2002) . A partir desses valores, foi calculado o PMS em kg ha<sup>-1</sup>.

Com base nessa produção foi calculados o Índice de Nutrição de Nitrogênio (INN) e a Eficiência de Utilização de Nitrogênio (EUN).

Com base na absorção crítica de N (Equação (1)). o INN foi calculado (Equação (2)) de acordo com (Lemaire; Gastal, 1997).

$$Nc = 3.6 (w)^{-0.34} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Nc = Porcentagem de nitrogênio (%) que não limita o crescimento da planta.

3.6 é um coeficiente usado para culturas C<sub>4</sub>.

-0.34 = coeficiente que representa o comportamento exponencial negativo da diluição da porcentagem de N durante a rebrota para culturas C<sub>4</sub>.

w = Quantidade de matéria seca produzida pela parte aérea da planta. expressa em ton ha<sup>-1</sup>.

$$INN = \frac{N\%}{Nc} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

Nc = Porcentagem de nitrogênio (%) que não limita o crescimento da planta.

N% = N% real da planta

A EUN baseada na produção de MS (kg de MS/kg de N aplicado) foi calculada de acordo com a

$$EUN (kgMS.kg^{-1}Nap) = \frac{MS \text{ adubado com } N - MS \text{ sem adubação de } N}{DN} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

MS = matéria seca (kg)

DN = Dose de N (100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>)

A recuperação de N pelas plantas foi calculada de acordo com a Equação (4):  $Nrec =$

$$\frac{NAN - NAWN}{ND} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

Nrec (kgNab.kgNap<sup>-1</sup>) = recuperação de nitrogênio

NAN = total de N absorvido pelos tratamentos com aplicação de N (kg ha<sup>-1</sup>)

NAWN = total de N absorvido pelo tratamento sem aplicação de N (kg ha<sup>-1</sup>)

DN = Dose de N (100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>).

As doses ideais de N foram calculadas usando os valores obtidos para cada curva ( $y = ax^2 + bx + c$ ) de acordo com a Equação (5) expressa abaixo:

$$\text{Dose ideal de } N = -\frac{b}{2a} \quad \text{Equação (5)}$$

As amostras secas da PMS foram moídas em moinho tipo Willey (peneira 1 mm) e para determinação das concentrações de N (método Kjeldahl), P, K, Ca, Mg e S (digestão nitro perclórica). Para as determinações de P e S, foi espectrofotômetro, e para K, Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). Determinou-se a proteína bruta (PB %), fibra em detergente ácido (FDA %), fibra em detergente neutro (FDN %), lignina (%), extrato etéreo (E.E %), material

mineral (M. M %), fibra bruta (FB %), digestibilidade *in vitro* (DIV %) e cinzas (%) de acordo com Detmann, (2021).

#### 2.2.4 Análise da soja

Para os teores de macronutrientes foliar, foi coletado o 3º trifólio totalmente desenvolvido de 30 plantas aleatórias por parcela. Após a amostragem, as folhas foram lavadas em água destilada e deionizada e secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 h. Em seguida, os materiais foram moídos em um moinho Willey. Para determinação das concentrações de N (método Kjeldahl), P, K, Ca, Mg e S (digestão nitro perclórica). Para as determinações de P e S, foi espectrofotômetro, e para K, Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997). A área colhida foi de 2 metros das três fileiras centrais de cada parcela. Após a colheita, o teor de umidade dos grãos foi corrigido para 13% e a produtividade calculada em kg ha<sup>-1</sup>.

#### 2.2.5 Análise de dados

A análise dos dados foi feita pelo software Statistical Analysis System (SAS OnDemand for Academics 2022). Foram realizadas as análises de normalidade de resíduos e homogeneidade da variância. Seguindo os pré-requisitos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com probabilidade de 5%. Constatada significância, as médias das fontes de N foram comparadas entre si pelo teste de Tukey e as doses por equações de regressão (Pimentel-Gomes, 2009). Os gráficos foram traçados utilizando Sigmaplot® 15.

### 2.3 Resultados

As avaliações na *Urochloa brizantha* cv. *Marandu* do segundo ano de avaliação, referente ao ano agrícola 2021, foram diretamente afetadas pelas geadas (figura 1b) ocorridas no ano do experimento, não atingindo altura mínima para realizar avaliações dos componentes. O primeiro corte da pastagem, ano agrícola 2020, foi feito simulação de pastejo.

### 2.3.1 Composição química das plantas

A tabela 3 estão apresentados os valores médios e os desvios padrão da composição química da *Urochloa brizantha* cv. *Marandu* por fonte. Para nenhum dos fatores houve diferença significativa ( $p > 0,05$ ). Os maiores valores médios de PB e DIV foram na primeira avaliação, com a  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  apresentando as maiores concentrações 16,3% e 75,3% respectivamente. FDN e fibra bruta tiveram os maiores valores médios na terceira avaliação, em ambas as avaliações a  $Ur_{\text{Conv}}$  (65,4% e 32,2%) apresentando os maiores valores. Para FDA, lignina EE e MM as concentrações médias foram encontradas na segunda avaliação, sendo a  $Ur_{\text{Duromide}}$  com os maiores valores para FDA e EE (35,9% e 2,9% respectivamente) e a  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  os maiores para lignina e MM, 4,3% e 10%.

As doses e fontes de N não apresentaram efeito significativo no estado nutricional da MS da pastagem ( $p > 0,05$ ). Os valores variaram entre as avaliações, estando dentro dos teores considerados adequados para Cantarella *et al.*, (2022), N variando entre 25,7 e 19,3 g kg<sup>-1</sup>, P 1,5 e 2,2 g kg<sup>-1</sup>, K 24,4 e 21,7 g kg<sup>-1</sup>, Ca 2,7 e 4,2 g kg<sup>-1</sup>, Mg 3,3 e 5,2 g kg<sup>-1</sup>, e S 1,1 e 2,1 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 4).

Nos dois primeiros anos de avaliações dos teores foliar de N na soja, houve interação fonte x dose (figura 2 a, b). Na safra de 2020/21, as três fontes responderam de forma quadrática as doses de N. O maior teor encontrado para as fontes foram 56,2 g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Formaldeído}}$ ), 53,9 g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Duromide}}$ ) e 53,1 g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Conv}}$ ), ambas na dose de 400kg ha<sup>-1</sup>. O mesmo comportamento (quadrático) não foi observado na segunda safra (2021/22), sendo linear a resposta para as três fontes. A dose de 400kg ha<sup>-1</sup> apresentou as maiores concentrações, 49,7 g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Formaldeído}}$ ), 49,7g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Conv}}$ ) e 48,6 g kg<sup>-1</sup> ( $Ur_{\text{Duromide}}$ ). Na safra 2022/23, houve resposta para fonte e dose isoladamente (figura 2 c), a fonte  $Ur_{\text{Duromide}}$  (52,3 g kg<sup>-1</sup>), diferenciou das  $Ur_{\text{Conv}}$  e  $Ur_{\text{Formaldeído}}$  (50,3 e 50,7 g kg<sup>-1</sup> respectivamente). A resposta para dose foi quadrática, com os maiores valores para doses de 200 e 400kg ha<sup>-1</sup> (52,6 g kg<sup>-1</sup>). Em todas as avaliações, os valores obtidos estão dentro da faixa considerada adequada.

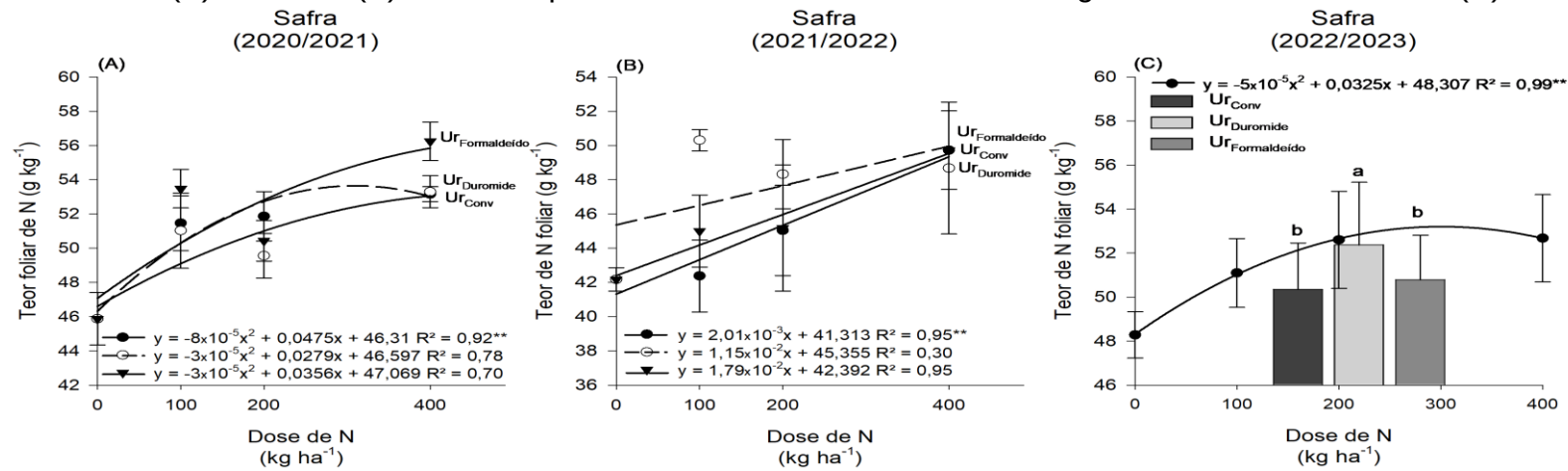
Os demais nutrientes não apresentaram diferença significativa ( $p > 0,05$ ) na cultura da soja, para as doses e fontes de N. Os valores variaram entre as avaliações, mas sempre ficando dentro dos teores considerados adequados para cultura, P variando entre 3,9 e 4,2 g kg<sup>-1</sup>, K 19,3 e 23,7 g kg<sup>-1</sup>, Ca 7 e 15 g kg<sup>-1</sup>, Mg 3,2 e 5,9 g kg<sup>-1</sup>, e S 2,8 e 3,6 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 4).

Tabela 6 Teor de proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, extrato etéreo (EE), matéria mineral (MM), digestibilidade in vitro (DIV) e fibra bruta na *Urochloa Brizantha* cv. *marandu*, para diferentes fontes e doses de N.

| Fonte                     | Ano Agrícola      | PB           | FDN          | FDA          | Lignina     | EE          | MM          | DIV          | Fibra bruta  |
|---------------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| ----- % -----             |                   |              |              |              |             |             |             |              |              |
| Ur <sub>Conv</sub>        | 2020 <sup>1</sup> | 15,88 ± 0,89 | 59,52 ± 2,19 | 32,96 ± 2,09 | 3,91 ± 0,63 | 2,73 ± 0,49 | 9,11 ± 0,54 | 74,67 ± 2,77 | 26,96 ± 1,33 |
| Ur <sub>Duromide</sub>    |                   | 16,04 ± 0,66 | 58,84 ± 2,27 | 32,94 ± 1,50 | 4,15 ± 0,80 | 2,79 ± 0,60 | 9,32 ± 0,62 | 74,83 ± 1,69 | 26,91 ± 1,02 |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> |                   | 16,32 ± 1,09 | 59,46 ± 2,48 | 32,23 ± 1,97 | 4,06 ± 0,75 | 2,79 ± 0,51 | 9,07 ± 0,52 | 75,36 ± 1,99 | 26,41 ± 1,49 |
| Ur <sub>Conv</sub>        | 2020 <sup>2</sup> | 12,47 ± 0,80 | 61,42 ± 2,39 | 35,55 ± 1,49 | 4,19 ± 0,53 | 2,82 ± 0,48 | 9,83 ± 0,57 | 74,36 ± 4,28 | 27,28 ± 1,74 |
| Ur <sub>Duromide</sub>    |                   | 12,77 ± 1,00 | 61,26 ± 1,41 | 35,90 ± 0,91 | 4,22 ± 0,46 | 2,94 ± 0,31 | 9,81 ± 0,50 | 74,68 ± 2,47 | 27,46 ± 1,28 |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> |                   | 12,53 ± 1,09 | 60,96 ± 1,81 | 35,72 ± 1,56 | 4,30 ± 0,70 | 2,89 ± 0,31 | 10,0 ± 0,72 | 74,01 ± 6,09 | 27,12 ± 1,42 |
| Ur <sub>Conv</sub>        | 2022 <sup>3</sup> | 11,79 ± 1,94 | 65,45 ± 1,23 | 34,37 ± 1,31 | 3,82 ± 0,50 | 1,31 ± 0,40 | 8,35 ± 0,56 | 67,02 ± 1,39 | 32,26 ± 1,23 |
| Ur <sub>Duromide</sub>    |                   | 12,43 ± 2,38 | 65,14 ± 1,33 | 34,30 ± 1,89 | 3,88 ± 0,45 | 1,32 ± 0,43 | 8,49 ± 0,53 | 66,88 ± 1,41 | 32,13 ± 1,67 |
| Ur <sub>Formaldeído</sub> |                   | 12,03 ± 1,93 | 65,44 ± 1,75 | 34,64 ± 1,43 | 3,95 ± 0,47 | 1,30 ± 0,43 | 8,47 ± 0,53 | 66,49 ± 1,45 | 32,15 ± 1,41 |

<sup>1</sup> corte (30/06/2020); <sup>2</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2020/21; <sup>3</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2022/23

Figura 7 Teor foliar de N da soja (3º trifólio) afetado pela interação entre fonte x dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2020-21 (A), 2021-22 (B) e afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2022-23 (C).



As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ).  $^{*}p < 0,05$ ,  $^{**}p < 0,01$ ,  $^{***}p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

Tabela 7 Teores de *macronutrientes* na *Urochloa Brizantha* cv. *Marandu* e na cultura da Soja.

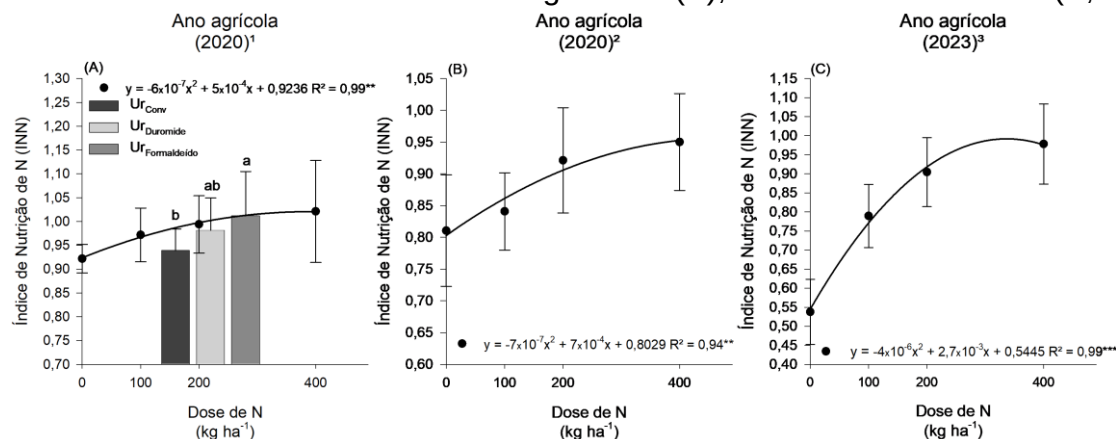
| Fonte                         | Ano agrícola<br>(Pastagem) | N                             | P            | K            | Ca           | Mg          | S           |
|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|                               |                            | -----g kg <sup>-1</sup> ----- |              |              |              |             |             |
|                               |                            | -----                         |              |              |              |             |             |
| Ur <sub>Conv</sub>            | 2020 <sup>1</sup>          | 25,41 ± 1,43                  | 1,53 ± 0,23  | 22,89 ± 2,65 | 2,81 ± 0,79  | 3,33 ± 0,36 | 1,23 ± 0,16 |
|                               |                            | 25,67 ± 1,05                  | 1,54 ± 0,25  | 22,52 ± 3,39 | 2,66 ± 0,36  | 3,18 ± 0,51 | 1,28 ± 0,21 |
| Ur <sub>Formaldeído</sub>     |                            | 26,11 ± 1,74                  | 1,52 ± 0,20  | 22,43 ± 3,41 | 2,62 ± 0,31  | 3,40 ± 1,03 | 1,24 ± 0,24 |
|                               |                            | Ur <sub>Conv</sub>            | 19,95 ± 1,28 | 2,19 ± 0,39  | 23,96 ± 3,81 | 3,57 ± 1,00 | 5,32 ± 1,37 |
| Ur <sub>Duromide</sub>        |                            |                               | 20,44 ± 1,60 | 2,29 ± 0,47  | 24,78 ± 4,31 | 3,63 ± 0,68 | 5,25 ± 1,03 |
|                               |                            | Ur <sub>Formaldeído</sub>     | 20,05 ± 1,75 | 2,25 ± 0,45  | 24,80 ± 3,22 | 3,51 ± 0,89 | 5,08 ± 1,26 |
| Ur <sub>Conv</sub>            | 18,87 ± 3,15               |                               | 2,19 ± 0,40  | 21,62 ± 4,12 | 4,31 ± 0,48  | 4,37 ± 0,87 | 2,11 ± 0,48 |
|                               | Ur <sub>Duromide</sub>     | 19,89 ± 3,80                  | 2,23 ± 0,43  | 21,87 ± 3,48 | 4,11 ± 0,49  | 4,20 ± 0,96 | 2,27 ± 0,41 |
| Ur <sub>Formaldeído</sub>     |                            | 19,25 ± 3,08                  | 2,18 ± 0,31  | 21,72 ± 3,79 | 4,19 ± 0,53  | 4,52 ± 1,08 | 2,20 ± 0,43 |
|                               | Fonte                      | Safra<br>(Soja)               | P            | K            | Ca           | Mg          | S           |
| -----g kg <sup>-1</sup> ----- |                            |                               |              |              |              |             |             |
| Ur <sub>Conv</sub>            | 2020/21                    | 4,00 ± 0,22                   | 19,74 ± 0,94 | 14,93 ± 1,11 | 5,95 ± 0,44  | 3,48 ± 0,61 |             |
| Ur <sub>Duromide</sub>        |                            | 4,02 ± 0,34                   | 19,82 ± 1,62 | 15,11 ± 1,04 | 5,97 ± 0,44  | 3,67 ± 0,61 |             |
| Ur <sub>Formaldeído</sub>     |                            | 3,88 ± 0,21                   | 19,67 ± 1,13 | 14,99 ± 1,11 | 5,98 ± 0,41  | 3,76 ± 0,52 |             |
| Ur <sub>Conv</sub>            | 2021/22                    | 4,24 ± 0,58                   | 20,07 ± 3,09 | 9,67 ± 1,03  | 5,95 ± 0,91  | 3,58 ± 0,63 |             |
| Ur <sub>Duromide</sub>        |                            | 4,02 ± 1,24                   | 19,70 ± 4,50 | 10,70 ± 2,14 | 5,96 ± 1,93  | 3,67 ± 0,59 |             |
| Ur <sub>Formaldeído</sub>     |                            | 4,33 ± 0,50                   | 20,96 ± 4,36 | 10,50 ± 1,99 | 6,18 ± 0,78  | 3,67 ± 0,57 |             |
| Ur <sub>Conv</sub>            | 2022/23                    | 3,95 ± 0,39                   | 23,48 ± 1,33 | 7,23 ± 0,58  | 3,22 ± 0,29  | 2,76 ± 0,63 |             |
| Ur <sub>Duromide</sub>        |                            | 3,88 ± 0,49                   | 24,40 ± 1,61 | 7,18 ± 0,62  | 3,12 ± 0,27  | 2,77 ± 0,65 |             |
| Ur <sub>Formaldeído</sub>     |                            | 3,90 ± 0,43                   | 23,47 ± 1,88 | 6,82 ± 0,38  | 3,25 ± 0,33  | 3,07 ± 0,62 |             |

Fonte: o autor 1

A avaliação na primeira avaliação da pastagem para INN, apresentou efeito para fonte e dose (figura 3 a), o fertilizante com maior valor foi a Ur<sub>Formaldeído</sub>, não diferenciando da Ur<sub>Duromide</sub>, e diferenciando da Ur<sub>Conv</sub>, para a doses a resposta foi quadrática, sendo a dose de 400kg ha<sup>-1</sup> a maior (1), os efeitos quadráticos se repetiram nas avaliações seguintes, (figura 3 b, c), em ambas as avaliações o maior

INN foi o da dose mais alta, na segunda avaliação o valor foi de 0,95 e na terceira de 0,97. Os valores de EUN e Nrec não tiveram diferença significativa ( $p > 0,05$ ).

Figura 8 Índice de Nutrição de N na *Urochloa Brizantha* cv. *marandu* afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (A), efeito das doses de N (B, C).



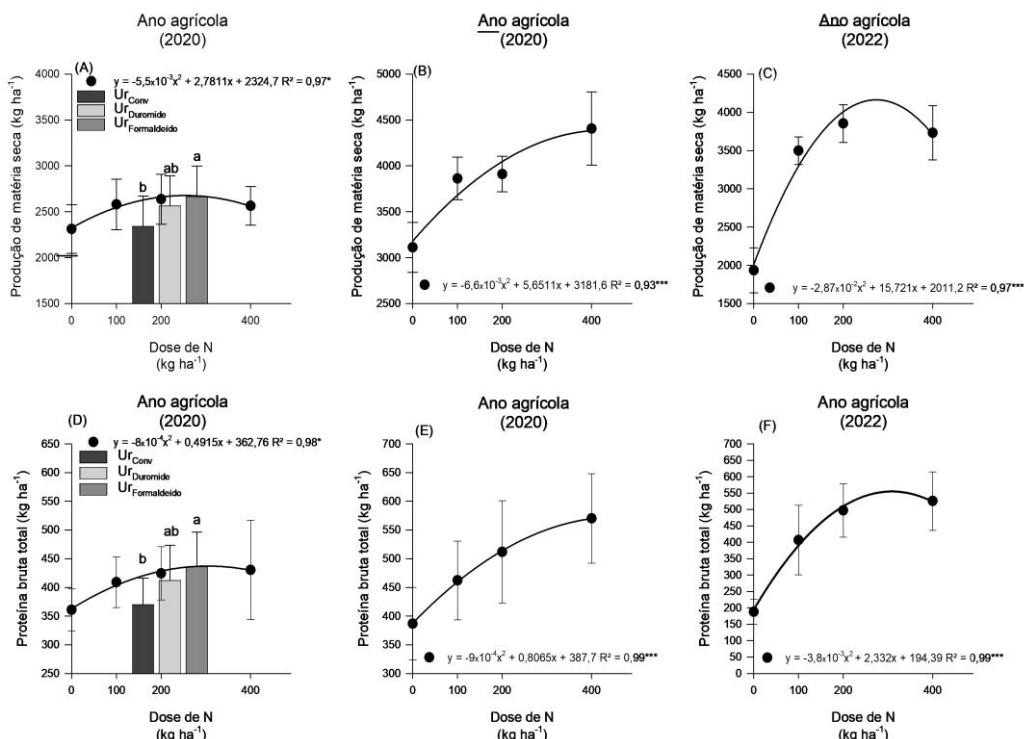
<sup>1</sup> corte (30/06/2020); <sup>2</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2020/21; <sup>3</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2022/23. As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ). \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

### 2.3.2 Produção de cultura e forragem

As variáveis produção de forragem e proteína bruta total (figura 4) responderam de forma similar a fertilização de N, na primeira avaliação, houve resposta para fonte e dose (figura 4a, d), em ambas a fonte  $Ur_{Formaldeído}$  obteve melhor desempenho, 2664,5kg ha<sup>-1</sup> para MS e 435,1 kg ha<sup>-1</sup> de PB<sub>total</sub>, não diferenciando da  $Ur_{Duromide}$  (2564,8 kg ha<sup>-1</sup> de MS e 2564,8 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente), e diferenciando da  $Ur_{Conv}$  que apresentou 2342,1kg ha<sup>-1</sup> de MS e 370,1kg ha<sup>-1</sup> de PB<sub>total</sub>. Em relação a dose, a resposta foi quadrática para os dois fatores, no qual, a melhor dose foi de 252,8kg ha<sup>-1</sup> de N e produzindo 2676,3kg ha<sup>-1</sup> de MS, e para PB<sub>total</sub> a melhor dose foi de 307,2kg ha<sup>-1</sup> com maior produção de 438,2kg ha<sup>-1</sup>.

Nas avaliações seguintes houve resposta apenas para dose, em todas a resposta foi quadrática (figura 4b, c, e, f), para segunda e terceira avaliações da PMS (figura 4b, c) a PMS teve como as melhores doses 428,1 e 273,9kg ha<sup>-1</sup>, com produção de 4391,3 e 4164,1kg ha<sup>-1</sup> respectivamente. Para as avaliações de PB<sub>total</sub> na segunda e terceira avaliações (figura 4e, f) as melhores doses foram 448 e 306,8 kg ha<sup>-1</sup> com produtividade máxima de 568,4 e 552,1kg ha<sup>-1</sup> respectivamente.

Figura 9 Produção de Matéria Seca da *Urochloa Brizantha* cv. *marandu* afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (A), efeito das doses de N (B, C), Produção de proteína bruta total afetado pela fonte e dose de fertilizantes nitrogenados (D), efeito das doses de N (E, F).

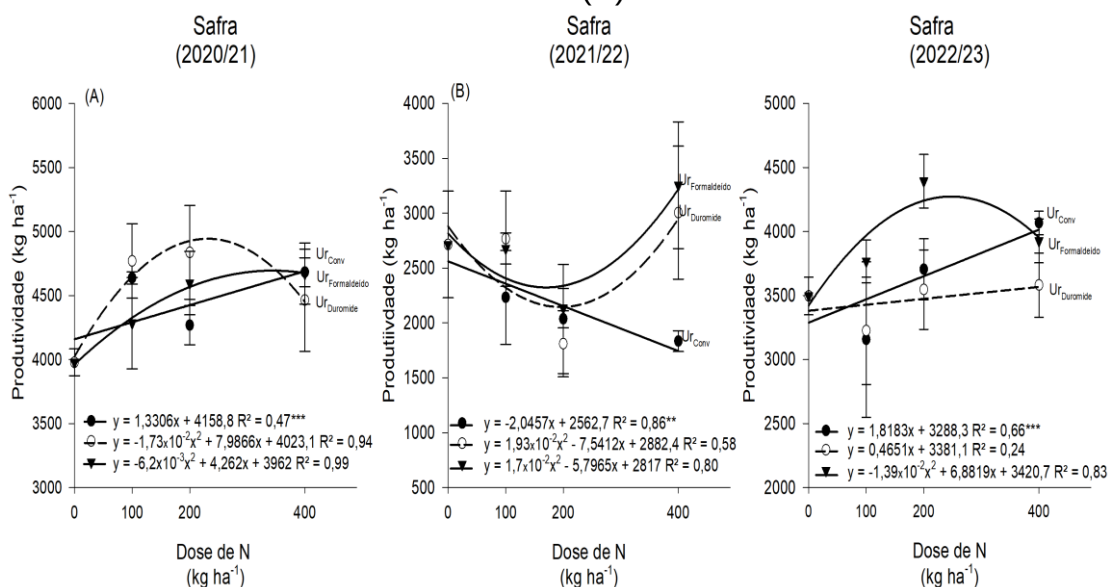


(30/06/2020); <sup>2</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2020/21; <sup>3</sup> valores da biomassa dessecada para safra 2022/23. As barras de erros indicam  $\pm$  desvio padrão, letras acima das barras de erro indicam diferença significativa entre as fontes de acordo com o teste Tukey ( $p < 0,05$ ). \* $p < 0,05$ , \*\* $p < 0,01$ , \*\*\* $p < 0,001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

Nas três safras da soja (2020/21, 2021/22 e 2022/23), houve interação fonte x dose (figura 5 a, b, c) para produtividade. Na safra de 2020/21, as fontes Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>Formaldeído</sub> responderam de forma quadrática ao efeito das doses de N, sendo a Ur<sub>Duromide</sub> obteve a melhor dose com 230,8kg ha<sup>-1</sup> com produtividade máxima de 4944,9kg ha<sup>-1</sup>, e Ur<sub>Formaldeído</sub> com a melhor dose de 343,7kg ha<sup>-1</sup> e maior produtividade de 4694,4 kg ha<sup>-1</sup>, e a Ur<sub>Conv</sub> a única a responder de forma linear, com a dose máxima (400kg ha<sup>-1</sup>) obtendo uma produtividade de 4682,8 kg ha<sup>-1</sup>. Na safra seguinte (2021/22), diferiram dos anteriores, as fontes Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>Formaldeído</sub>, novamente apresentaram uma resposta quadrática (figura 5b), entretanto, o ponto de máxima de ambas foi na maior dose (400kg ha<sup>-1</sup>). A Ur<sub>Duromide</sub> obteve um desempenho 3005,0kg ha<sup>-1</sup> de produtividade, enquanto, a Ur<sub>Formaldeído</sub> 3255,4kg ha<sup>-1</sup>. A fonte Ur<sub>Conv</sub> novamente obteve resposta linear para as doses, entretanto, de forma negativa, e sua maior dose de 400kg ha<sup>-1</sup> obtendo a menor produtividade 1834,1kg ha<sup>-1</sup>. Essa

diminuição na produtividade com aumento das doses, não se repetiu na última safra avaliada (2022/23), a  $Ur_{Conv}$ , apresentou novamente um comportamento linear, entretanto, como na primeira safra (2020/21), respondeu positivamente, e a dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  obteve a produtividade máxima de  $4067,3\text{ kg ha}^{-1}$  (figura 5c), a  $Ur_{Formaldeído}$  respondeu quadraticamente as doses aplicadas, repetindo o comportamento dos anos anteriores, e a melhor dose foi de  $247,5\text{ kg ha}^{-1}$  com produtividade máxima de  $4272,5\text{ kg ha}^{-1}$ . A  $Ur_{Duromide}$  apresentou a menor produtividade, comparada as demais fontes, a dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  produziu  $3581,6\text{ kg ha}^{-1}$  de soja.

Figura 10 Produtividade da soja afetado pela interação entre fonte x dose de fertilizantes nitrogenados na safra 2020-21 (A), safra 2021-22 (B) e safra 2022-23 (C).



\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$  e ns - não significativo ( $p > 0,05$ ).

## 2.4 Discussão

### 2.4.1 Composição química e produção de forragem

As paredes celulares das forragens são compostas por proporções variáveis de celulose, hemicelulose, pectina, lignina e minerais que diferem entre as espécies e os estágios de crescimento das plantas (Jung; Casler, 2006). A FDN quantifica a maioria dos componentes das paredes celulares (Van Soest; Robertson; Lewis, 1991). Composta principalmente por lignocelulose, uma estrutura rígida e de difícil hidrólise, formada por polímeros de celulose, hemicelulose e lignina. A lignocelulose constitui de 30% a 70% da MS das forragens e também é o principal reservatório de carbono fixado na natureza (Grabber, 2005; Jung; Casler, 2006; Papa *et al.*, 2012). As concentrações de FDN obtidas neste estudo (tabela 3) contrastam com os resultados encontrados por Johnson *et al.* (2001); Dupas *et al.*, (2016); Delevatti *et al.* (2019); Leite *et al.* (2021), no quais o aumento das doses de N resultou em redução do FDN. Delevatti *et al.* (2019), correlacionaram a diminuição nas concentrações de FDN, com aumento da PB. Essa correlação também fora encontrada neste estudo, entretanto, em ambas PB e DFN não houve diferença com as fontes e doses aplicadas (tabela 3). Os resultados de alguns outros estudos concordam com os nossos; por exemplo, Bennett *et al.*, (2008) não observaram mudanças no teor de FDN causadas pelas doses de N.

Essas alterações estão associadas à época de avaliação, principalmente durante a estação de crescimento. Durante a estação de crescimento, taxas de crescimento mais altas resultam em acúmulo de caule e, portanto, a FDN aumenta (Sbrissia; Silva, 2008; Delevatti *et al.*, 2019).

Pesquisas anteriores constataram que o aumento da fertilização com N teve pouco ou nenhum efeito sobre a FDA (Dupas *et al.*, 2016; Di Loreto *et al.*, 2019). O que corrobora com nosso estudo, não havendo diferença entre fontes e doses, apenas uma variação entre os períodos de avaliações. A concentração da parede celular da planta pode variar devido a variações na precipitação e na temperatura. esses fatores climáticos afetam a maturidade das plantas (Leite *et al.*, 2021). A combinação de temperaturas relativamente mais baixas e a ausência de chuva no início da estação de crescimento pode resultar em um estado reprodutivo da forragem, o que poderia

aumentar as frações de fibra (Nascimento *et al.*, 2021) e explicar essas alterações nas concentrações de FDA. De acordo com Van Soest, (1994), os teores de FDN e FDA abaixo de 60% e 40%, respectivamente, são considerados adequados para uma boa qualidade de forragem para o gênero *Urochloa*.

As fontes e doses não influenciaram nas concentrações de lignina, assim como observado por Dupas *et al.* (2016), que, ao comparar a  $Ur_{Conv}$  com uma fonte contendo inibidor de urease, não encontrou diferenças entre as fontes, outros estudos com doses corroboram com nossos resultados em *Urochloa Brizantha* cv. *marandu*, (Viana *et al.*, 2011; McRoberts *et al.*, 2018; Delevatti *et al.*, 2019; Leite *et al.*, 2021). O aumento dos níveis de fertilização e fontes não afetaram a DIV, ficando acima da faixa de 550-600g kg<sup>-1</sup> de MS para as cultivares de *marandu* (Barbero *et al.*, 2015; Dupas *et al.*, 2016; McRoberts *et al.*, 2018).

Não foram observadas diferenças para as doses e fontes nos teores de MM (ou cinzas) os que vai de encontro com os resultados obtidos por McRoberts *et al.*, (2018) e Delevatti *et al.*, (2019). Berça *et al.* (2021) em seu estudo com *Urochloa Brizantha* cv. *marandu* obteve valores próximos aos deste estudo, e assim como aqui observado, não demonstrando diferença significativa a adição de N.

A concentração média de PB do capim-*marandu* é geralmente inferior a 10% (Dupas *et al.*, 2016; Ruggieri *et al.*, 2020) Os valores observados em nosso estudo variaram de 12% a 16%, próximos aos semelhantes aos encontrados por Barbero *et al.*, (2015) e Koscheck *et al.*, (2020) (11% a 14%) e aos observados por (McRoberts *et al.*, 2018), que foi de 13% a 15%.

Os aumentos nas concentrações de  $PB_{Total}$  da forragem eram esperados (figura 4d, e, f). A fertilização com nitrogênio aumenta a síntese de proteínas a partir de carboidratos (Berça *et al.*, 2021), e aminoácidos (Dupas *et al.*, 2016). A reposta quadrática para as doses de N nas três avaliações é semelhantes aos observados em outros estudos (Dupas *et al.*, 2016; McRoberts *et al.*, 2018; Delevatti *et al.*, 2019; Di Loreto *et al.*, 2019). A diferença encontrada para as fontes na primeira avaliação (figura 4d), pode estar ligada as perdas de amônia  $N-NH_3$  pelos fertilizantes nitrogenados. As perdas pelo fertilizante  $Ur_{Conv}$  eram esperadas, sendo amplamente estudado, recentemente por Cassimiro *et al.*, (2023) e Meirelles *et al.* (2022), em estudos com aplicação de ureia em pastagem sob condições similares ao deste estudo, obtiveram valores entre 20 e 40% de perda, podendo assim ter restringido o consumo da planta pelo nutriente.

A  $Ur_{Duromide}$  um estabilizador que combina duas moléculas, NBPT e Duromide, ambas inibindo a atividade da enzima urease, obtendo a vantagem de uma estrutura química mais estável em condições de baixo pH e alta temperatura do solo (CASSIM *et al.*, 2021). Isso permite maior eficiência na redução das perdas de  $N-NH_3$  em comparação a  $Ur_{Conv}$ . Cassimiro *et al.* (2023) em condições similares ( $Ur_{conv}$  e  $Ur_{Duromide}$ ) em *Urochloa Brizantha* cv. *marandu* observa-se diminuições de até 90% de perdas de  $N-NH_3$  pelo fertilizante  $Ur_{Duromide}$  comparada a  $Ur_{Conv}$  e consequentemente um aumento de 52% na MS.

A disponibilidade de N da  $Ur_{Formaldeído}$  (fertilizante de liberação lenta) depende da decomposição das cadeias poliméricas ureia-aldeído em  $CO_2$  e  $NH_4^+$  pela atividade microbiológica, e pelas propriedades do solo, como teor de argila, pH, umidade e temperatura, afetando a decomposição e a liberação de N (Guelfi, 2017; Jahns; Ewen; Kaltwasser, 2003). Ma *et al.* (2023) estudando a  $Ur_{Formaldeído}$  na cultura do trigo, observou um aumento de 5,8% na produtividade e 7,7% na absorção de N pela cultura comparada a  $Ur_{Conv}$ .

Nas duas avaliações seguintes (figura 4e, f) não houve a diferença entre fonte, na segunda a explicação deve estar associada a não aplicação dos fertilizantes, e o efeito residual ser insuficiente para diferenciação entre fontes. Na terceira avaliação a nossa hipótese é a perda da eficácia dos fertilizantes nitrogenados causados pelo aumento de MO devido a palhada deixada no solo e ao N deixado pela fixação biológica pela cultura da soja. Pan *et al.* (2016) relata em condições com grandes quantidades de palha na superfície do solo, a quantidade de enzima urease no solo será maior, aumentando as perdas por volatilização de  $N-NH_3$  em até 25,5%. Ou seja, os estabilizadores são capazes de reduzir, mas não de eliminar a atividade da enzima urease, possivelmente devido às altas quantidades dessa enzima em sistemas com grandes quantidades de palha. Por essa razão, Cassim *et al.* (2022) conclui que a  $Ur_{Duromide}$  não é a mais adequada para ambientes onde há grandes quantidades de resíduos de palha na superfície do solo. O aumento da matéria orgânica deixada pela palhada na sucessão do ciclos pode ocasionar a diminuição do efeito da  $Ur_{Formaldeído}$ , essa tecnologia necessita ser quebrada por enzimas ou organismos no solo para ficarem disponíveis para plantas (Cardoso; Andreote, 2016; Reetz, 2016; Oliveira *et al.*, 2022). O que corrobora com nossa hipótese, são os resultados observados nas perdas de  $N-NH_3$ .

Em resumo, a massa de forragem é o resultado líquido do crescimento, da senescência e dos processos de pastejo (Bircham; Hodgson, 1983; Sbrissia *et al.*, 2018). A entrada de N na pastagem afeta positivamente a densidade populacional de perfilhos devido à geração mais rápida de novas folhas a partir de vários botões axilares (Lafarge, 2006; Paiva *et al.*, 2012, 2015; Dos Santos *et al.*, 2023). O aumento na MS (figura 4<sup>a</sup>, b, c) segue as mesmas tendências da PB<sub>Total</sub>. Recentes estudos correlacionam a fertilização nitrogenada aos ganhos de MS na pastagem (Galindo *et al.*, 2018; Cecagno *et al.*, 2019; Meirelles *et al.*, 2022; Cassimiro *et al.*, 2020, 2023). Além disso, dos Santos *et al.* (2023), observaram que aplicação de fertilizante de nitrogênio na pastagem ou a entrada de N no sistema via FBN levou a um aumento na taxa de lotação de 43,9 e 49,8% de bovinos respectivamente em seu estudo, em comparação com a pastagem não fertilizada. De acordo com (Cardoso *et al.*, 2016), o fertilizante nitrogenado é a maneira mais rápida e fácil de produzir mais carne em menos área, com menos impacto ambiental. Isso é altamente relevante para as condições de produção brasileiras, onde prevalece o sistema de produção de carne bovina em pastagens extensivas.

No que diz respeito ao INN (figura 3), valores inferiores a 1 ( $INN < 1$ ) indicam deficiência de N, enquanto  $N = 1$  é considerado o nível crítico e valores acima de 1 ( $INN > 1$ ) são considerados consumo de luxo (Lemaire; Jeuffroy; Gastal, 2008; Lemaire; Meynard, 1997). Portanto, um valor de INN igual ou superior a 1 indica que a cultura não está limitada pelo suprimento de N no momento da colheita. Por esse aspecto entendemos que efeito residual deixado na segunda avaliação (figura 3b), que as altas deixaram um efeito benéfico no sistema, em relação a terceira avaliação, podemos concluir que o N deixado pela FBN não é suficiente para *Urochloa*. Nossos resultados vão de encontro com os de (Assmann *et al.*, 2015), que afirmaram que a fixação de N pela soja não é suficiente para manter a fase subsequente da pastagem.

De modo geral os macronutrientes P, Ca e S (tabela 4) aumentaram entre a primeira avaliação e a última. Os baixos teores iniciais estão ligados a baixa fertilidade do solo (tabela 1) e o aumento nos teores no estado nutricional da pastagem pode ser devido aos efeitos da adubação na cultura da soja (tabela 2). (Assmann *et al.*, 2017) explica o conceito de Adubação de Sistemas tem como base a ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de um sistema de rotação buscando a máxima eficiência de uso de nutrientes. O aumento de Mg e principalmente de K no segundo ciclo pode ser atribuída ao fato de que a *Urochloa* possui um sistema radicular extenso e suas

raízes podem exsudar ácidos orgânicos (Almeida; Penn; Rosolem, 2018), os quais solubilizam o K presente do solo (Volf *et al.*, 2023). Isso resulta na capacidade das plantas de ciclar o K (Garcia *et al.*, 2008; Rosolem; Vicentini; Steiner, 2012; Volf *et al.*, 2021).

#### 2.4.2 Estado nutricional e produtividade da soja

A fertilização do sistema em ILP aumenta a produção de forragem, possibilitando maior produção animal com efeitos residuais de nutrientes para a produção de grãos em sucessão (Sandini *et al.*, 2011; Farias *et al.*, 2020). As produções de biomassa e o potencial de ciclagem de nutrientes resultam em aumento de 28% na produtividade da soja, comparado com a soja cultivada sem resíduos no solo (SILVA *et al.*, 2023). Neste estudo, no tratamento onde não houve aplicação de N na primeira safra 2020/21 (figura 5a), a melhoria pelo sistema ILP é evidente, ao ser comparada a média nacional brasileira de produtividade de soja (Conab, 2023), o aumento é de 12%. Entende-se que uma pequena parcela do território é no sistema ILP, representando 5% do total da pecuária e agricultura no Brasil (EMBRAPA, 2016). A pastagem produzida nesses sistemas intercalares pode fornecer alimento para o gado por meio de corte mecânico ou pastejo ou pode ser usada para a produção de feno ou como cultura de cobertura para o plantio direto (Pariz *et al.*, 2011; Mateus *et al.*, 2016, 2020; Moraes *et al.*, 2019).

Os efeitos da  $Ur_{Conv}$  são conhecidos, principalmente quando se refere à pastagem. No entanto, os possíveis efeitos residuais desse fertilizante no sistema ainda são pouco estudados. Costa *et al.* (2021a) observaram um aumento no rendimento de grãos em 800 kg ha<sup>-1</sup> em comparação com os sistemas de cultivo sem fertilização com N. Em nosso estudo a diferença foi de 700kg ha<sup>-1</sup> na dose de 400kg ha<sup>-1</sup>, se compararmos a média nacional, o aumento na produtividade chegou a 32.8%. Os fertilizantes  $Ur_{Duromide}$  e  $Ur_{Formaldeído}$  obtiveram resultados positivos na primeira safra (figura 5a), a  $Ur_{Duromide}$  na dose de 230kg ha<sup>-1</sup>, apresentou uma diferença de 967 kg ha<sup>-1</sup> de produtividade comparada ao tratamento controle (sem N), e  $Ur_{Formaldeído}$  um acréscimo de 716kg ha<sup>-1</sup> comparada a mesma, em relação a média nacional a diferença foi de 40% e 33% respectivamente. Esses resultados estão relacionados ao uso adequado de N afeta diretamente a produção e a qualidade nutricional da matéria seca e, consequentemente, o acúmulo de nutrientes na biomassa, sistemas

radiculares profundos e absorção de nutrientes no perfil do solo (Pariz *et al.*, 2017; Rosolem; Steiner, 2017; Tanaka *et al.*, 2019; Mateus *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2021a; Crusciol *et al.*, 2021). A aplicação de N em gramíneas forrageiras pode acelerar a decomposição da biomassa (Costa *et al.*, 2016). De acordo com (Costa *et al.*, 2014), são necessários 6 meses para que 60% de todo o N sejam liberados do resíduo de *Urochloa*. Mesmo os efeitos dos fertilizantes são terem sido significativos na produção de MS (figura 4a, b), os efeitos foram observados na produtividade de grãos. Reforçando as afirmações de Baptistella *et al.* (2020) que para uma ciclagem eficaz, a liberação de nutrientes dos resíduos deve ser sincronizada com a demanda da cultura comercial cultivada posteriormente.

Os resultados da segunda safra 2021/22 (figura 5b) não eram esperados, especialmente a dose de 400kg ha<sup>-1</sup> da Ur<sub>Conv</sub> apresentando a menor resposta. Tais resultados podem estar atrelados a problemas climáticos e plantas daninhas, como já mencionado anteriormente, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados, houve três geadas (figura 1b), impossibilitando o desenvolvimento da pastagem. O estresse por baixa temperatura também pode afetar a fotossíntese, reduzindo a exportação de fotossintatos dos cloroplastos (Kratsch; Wise, 2000; Filho *et al.*, 2018). O outro fator preponderante, que pode ter causado tais resultados é a competição pelo N aplicado com plantas invasoras, Schuster *et al.*, (2016) identificou em 15 anos de estudo, que pastagem com de baixa intensidade de pastagem (deixando a pastagem com maior biomassa) tiveram menos ervas daninhas emergindo em comparação com os outros tratamentos de pastagem. A baixa intensidade de pastejo pode permitir que as gramíneas mais altas sejam mais competitivas com as ervas daninhas (ou seja, por luz e espaço) do que a alta intensidade de pastejo, reduzindo, assim, o crescimento e a fecundidade (Baskin e Baskin, 2014), resultando em um filtro ecológico semelhante de culturas de cobertura não pastejadas (McKenzie *et al.*, 2016). Nossa hipótese é que os altas doses de N aplicada nutriram diretamente as plantas daninhas, fazendo que sobressaísse a competição espaço com a *urochloa*, retardando o desenvolvimento da mesma, este efeito é observado na Ur<sub>Conv</sub> em linear negativa, ou seja, com o aumento das doses houve uma diminuição na produção de grãos (figura 5b), e nas doses de 100 e 200kg dos fertilizantes Ur<sub>Duromide</sub> e Ur<sub>Formaldeído</sub>, nas doses de 400kg ha<sup>-1</sup> a produtividade da soja sofre um aumento, essa diferença pode estar atrelada as funcionalidades dos fertilizantes, seja para inibir as perdas causadas pela urease (volatilização da N-NH<sub>3</sub>) ou a liberação lenta, o que em doses mais altos pode

ter sido suficiente para que a pastagem conseguisse se estabelecer melhor. Um fator que corrobora com a possível hipótese é o teor foliar de N (figura 2b), os teores variaram positivamente com o acréscimo das doses, demonstrando que o N aplicado ficou no sistema, entretanto, provavelmente no caso da  $Ur_{Conv}$  em plantas invasoras.

Além dos problemas já citados, a safra 2021/22 sofreu com ocorrências de veranicos (figura 1b), limitando a produção de grãos (figura 5b). O tratamento controle ficou 10% abaixo da produtividade média nacional, a  $Ur_{Conv}$  na dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  teve uma diminuição de 40% em relação à média brasileira, já as fontes  $Ur_{Duromide}$  e  $Ur_{Formaldeído}$  obtiveram melhores resultados, em ambas a dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  obteve melhor desempenho, a  $Ur_{Duromide}$  ficou apenas 0,7% abaixo da média nacional, que nesta safra foi abaixo das últimas 6 safras com  $3,026\text{ kg ha}^{-1}$ . O fertilizante  $Ur_{Formaldeído}$  apresentou um acréscimo de 7,5% de produtividade.

Os resultados terceira safra 2022/23 (Figura 5c), são semelhantes ao da safra 2020/21, com exceção da  $Ur_{Duromide}$ , que demonstrou um desempenho inferior. O tratamento controle (sem N) obteve uma produtividade ( $3496\text{ kg ha}^{-1}$ ) próxima à média nacional ( $3508\text{ kg ha}^{-1}$ , Conab, 2023), este resultado é extremamente positivo, sendo que a produção de soja em solos arenosos é muito arriscada devido às irregularidades das chuvas (Silva *et al.*, 2020). Demonstrando o que muitos estudos afirmam, sobre os benefícios da adoção do ILP sob plantio direto para a intensificação sustentável da produção agrícola em regiões tropicais e subtropicais (Telles; Reydon; Maia, 2018; Moraes *et al.*, 2019; Deiss *et al.*, 2020; Mateus *et al.*, 2020; Pariz *et al.*, 2020; Crusciol *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2021b). A maioria concluiu que os sistemas especializados de soja sob pastagem beneficiam a estabilidade de todo o sistema em comparação com outras práticas de uso da terra, reduzindo a variabilidade ambiental, melhorando a lucratividade e reduzindo o risco de quebra de safra em anos desfavoráveis.

O fertilizante  $Ur_{Conv}$  na dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  obteve um ganho de 16% em relação à média nacional, a  $Ur_{Formaldeído}$  obteve a melhor dose ( $247,5\text{ kg ha}^{-1}$ ) uma produtividade de  $4272,5\text{ kg ha}^{-1}$ , um acréscimo de 21% em relação à média nacional, os resultados deste fertilizante nitrogenado se mostraram eficaz nos três anos de avaliação, podendo estar ligado a liberação lenta do N, consequentemente a diminuição das perdas por volatilização da  $\text{N-NH}_3$  (dados não publicados). O fertilizante  $Ur_{Duromide}$ , foi diminuindo sua eficiência conforme os ciclos da ILP, na safra 2022/23 (figura 5c) a dose de  $400\text{ kg ha}^{-1}$  foi somente 2% maior que a produtividade

média nacional, esse resultado aquém do esperado, pode estar ligado aos aspectos já explicado anteriormente, onde Cassim *et al.* (2022) concluíram que a  $Ur_{Duromide}$  não é fonte mais adequada para ambientes onde há grandes quantidades de resíduos de palha na superfície do solo, e consequentemente aumento da MO. O uso de N na adubação da pastagem se mostrou positiva para produção de grãos, mesmo sem o componente animal, que devolvem aproximadamente 70-95% dos nutrientes ingeridos pelos animais (Balbinot Junior *et al.*, 2009; Dubeux Jr. *et al.*, 2014), evidenciando a necessidade de mais estudos com os fertilizantes nitrogenados.

### **3 CONCLUSÃO**

As alterações observadas na composição da forragem ao longo das safras evidenciam a interconexão complexa entre a fertilização, as condições climáticas e os estágios de crescimento da pastagem. Essa dinâmica destaca a importância de considerar esses fatores inter-relacionados ao otimizar práticas de manejo e fertilização em pastagens.

A fertilização nitrogenada impactou positivamente a produção de grãos, mesmo em sistemas sem o componente animal, ressaltando a importância dessa prática para a intensificação sustentável da produção agrícola.

O estudo destaca a necessidade de sincronizar a liberação de nutrientes dos resíduos com a demanda da cultura comercial cultivada posteriormente, destacando a importância da gestão adequada dos resíduos para uma ciclagem eficaz.

A variação no desempenho dos fertilizantes ao longo dos ciclos e em diferentes condições destaca a complexidade dessa área de pesquisa. A necessidade contínua de estudos sobre a eficácia, liberação de nutrientes e interações com as condições do solo ressalta a importância de uma abordagem científica contínua para otimizar o uso de fertilizantes nitrogenados.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A. Assessment of phosphorus availability in soil cultivated with ruzigrass. **Geoderma**, v. 312, p. 64–73, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.003>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; PAULO CESAR SENTELHAS; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. de A.; KUNRATH, T. R.; BAYER, C.; CARVALHO, P. C. de F.; FRANZLUEBBERS, A. J. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 967–978, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000013>
- ASSMANN, T. S.; SOARES, A. B.; LUIZ, A.; HUF, F. L.; DE LIMA, R. C. Adubação de Sistemas em Integração Lavoura-Pecuária. 2017.
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A. de; VEIGA, M. da; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, v. 39, p. 1925–1933, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000107>
- BAPTISTELLA, J. L. C.; DE ANDRADE, S. A. L.; FAVARIN, J. L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 119, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- BARBERO, R. P.; MALHEIROS, E. B.; ARAÚJO, T. L. R.; NAVE, R. L. G.; MULLINIKS, J. T.; BERCHIELLI, T. T.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Combining Marandu grass grazing height and supplementation level to optimize growth and productivity of yearling bulls. **Animal Feed Science and Technology**, v. 209, p. 110–118, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.09.010>
- BERÇA, A. S.; CARDOSO, A. D. S.; LONGHINI, V. Z.; TEDESCHI, L. O.; BODDEY, R. M.; REIS, R. A.; RUGGIERI, A. C. Protein and Carbohydrate Fractions in Warm-Season Pastures: Effects of Nitrogen Management Strategies. **Agronomy**, v. 11, n. 5, p. 847, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050847>
- BIRCHAM, J. S.; HODGSON, J. The influence of sward condition on rates of herbage growth and senescence in mixed swards under continuous stocking management.

**Grass and Forage Science**, v. 38, n. 4, p. 323–331, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1983.tb01656.x>

BONAUDO, T.; BENDAHAN, A. B.; SABATIER, R.; RYSCHAWY, J.; BELLON, S.; LEGER, F.; MAGDA, D.; TICHIT, M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. **European Journal of Agronomy**, v. 57, Integrated crop-livestock, p. 43–51, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>

BONETTI, J. de A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; DE MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280–291, 2019.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; ALVES JUNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. Mutual analyses of agriculture land use and transportation networks: The future location of soybean and corn production in Brazil. **Agricultural Systems**, v. 194, p. 103264, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103264>

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van. **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 1. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022.

CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEM, A.; ALVES, B. J. R.; DE CARVALHO, I. D. N. O.; DE BARROS SOARES, L. H.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 86–96, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007>

CARDOSO, E. J. B. N.; ANDREOTE, F. D. **Microbiologia do solo**. [S. l.]: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2016. CASSIM, B. M. A. R.; BESEN, M. R.; KACHINSKI, W. D.; MACON, C. R.; DE ALMEIDA JUNIOR, J. H. V.; SAKURADA, R.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Nitrogen Fertilizers Technologies for Corn in Two Yield Environments in South Brazil. **Plants**, v. 11, n. 14, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants11141890>

CASSIM, B. M. A. R.; KACHINSKI, W. D.; BESEN, M. R.; CONEGLIAN, C. F.; MACON, C. R.; PASCHOETO, G. F.; INOUE, T. T.; BATISTA, M. A. Duromide increase NBPT efficiency in reducing ammonia volatilization loss from urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210017>. Acesso em: 13 out. 2021.

CASSIMIRO, J. B.; DE OLIVEIRA, C. L. B.; BONI, A. D. S.; DONATO, N. D. L.; MEIRELLES, G. C.; DA SILVA, J. F.; RIBEIRO, I. V.; HEINRICHS, R. Ammonia

Volatilization and Marandu Grass Production in Response to Enhanced-Efficiency Nitrogen Fertilizers. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 837, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030837>

CASSIMIRO, J. B.; ROCHETTI, A. C. A.; HEINRICHS, R.; CASTILLO, E. O. F. Volatilização da amônia e avaliação do capim-marandu sob doses e fontes de fertilizantes nitrogenados. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e526985823–e526985823, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5823>

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. V. G. de A.; ANGHINONI, I.; BRAMBILLA, D. M.; NABINGER, C. Acidificação do solo sob fertilização nitrogenada de longo prazo em campo nativo com introdução de azevém. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 2, p. 263–267, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711812019263>

CONAB, C. N. de A. **Série histórica das safras**. [s. l.], 2023. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911>. Acesso em: 5 out. 2023.

CORDEIRO, C. F. dos S.; ECHER, F. R. Interactive Effects of Nitrogen-Fixing Bacteria Inoculation and Nitrogen Fertilization on Soybean Yield in Unfavorable Edaphoclimatic Environments. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 15606, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52131-7>

CORRÊA, L. de A. Pastejo rotacionado para produção de bovinos de corte. In: 2000, **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. : In: SIMPÓSIO DE FORRAGICULTURA E PASTAGENS, 2000, Lavras, MG. Temas em, 2000.

COSTA, C. H. M. D.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; FERRARI NETO, J.; MORO, E. Nitrogen fertilization on palisadegrass: phytomass decomposition and nutrients release. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 46, n. 2, p. 159–168, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4639297>

COSTA, N. R. *et al.* Recovery of <sup>15</sup>N fertilizer in intercropped maize, grass and legume and residual effect in black oat under tropical conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 310, p. 107226, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107226>

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; LOPES, K. S. M.; SANTOS, F. G. dos; PARIZ, C. M. Acúmulo de macronutrientes e decomposição da palhada de braquiárias em razão da adubação nitrogenada durante e após o consórcio com a

cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1223–1233, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400019>

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; CASTILHOS, A. M. de; NASCIMENTO, C. A. C. do; LIMA, C. G. da R.; BONINI, C. dos S. B.; KURAMAE, E. E. Can Palisade and Guinea Grass Sowing Time in Intercropping Systems Affect Soybean Yield and Soil Chemical Properties? **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.00081>. Acesso em: 9 out. 2023.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BOSSOLANI, J. W.; PASCOALOTO, I. M.; DA ROCHA LIMA, C. G.; DOS SANTOS BATISTA BONINI, C.; DE CASTILHOS, A. M.; CALONEGO, J. C. Soybean yield and nutrition after tropical forage grasses. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 121, n. 1, p. 31–49, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10157-2>

CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Upland rice intercropped with forage grasses in an integrated crop-livestock system: Optimizing nitrogen management and food production. **Field Crops Research**, v. 261, p. 108008, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108008>

DEISS, L.; KLEINA, G. B.; MORAES, A.; FRANZLUEBBERS, A. J.; MOTTA, A. C. V.; DIECKOW, J.; SANDINI, I. E.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. Soil chemical properties under no-tillage as affected by agricultural trophic complexity. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 1090–1105, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12869>

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A. S.; BARBERO, R. P.; LEITE, R. G.; ROMANZINI, E. P.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7596, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>

DETMANN, E. **Métodos para Análise de Alimentos**. 2. ed. Viçosa, MG: Suprema Gráfica, 2021.

DI LORETO, R.; ABREU, J. G. de; CABRAL, L. da S.; NETO, A. B.; FERREIRA, L. M. M.; CABRAL, C. E. A.; BARROS, L. V. de; FAVARE, H. G. de; HERRERA, D. M.; HERRERA, L. D. S. Nitrogen Fertilization of Marandu Palisadegrass under Different Periods of Deferment. **Journal of Experimental Agriculture International**, p. 1–8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v34i230172>

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das Pastagens no Brasil. n. 1, p. 36, 2014.

DOS SANTOS, C. A.; MONTEIRO, R. C.; HOMEM, B. G. C.; SALGADO, L. S.; CASAGRANDE, D. R.; PEREIRA, J. M.; DE PAULA REZENDE, C.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Productivity of beef cattle grazing *Brachiaria brizantha* cv. Marandu with and without nitrogen fertilizer application or mixed pastures with the legume *Desmodium ovalifolium*. **Grass and Forage Science**, v. 78, n. 1, p. 147–160, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gfs.12581>

DUBEUX JR., J. c. b.; SOLLENBERGER, L. e.; VENDRAMINI, J. m. b.; INTERRANTE, S. m.; LIRA JR., M. a. Stocking Method, Animal Behavior, and Soil Nutrient Redistribution: How are They Linked? **Crop Science**, v. 54, n. 5, p. 2341–2350, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.01.0076>

DUPAS, E.; BUZETTI, S.; RABÊLO, F. H. S.; SARTO, A. L.; ANDRÉ LUIS SARTO ME - SERVIÇOS AGRÍCOLAS, IVINHEMA, MATO GROSSO DO SUL STATE, ZIP CODE 79740-000, BRAZIL; CHENG, N. C.; LUIZ DE QUEIROZ COLLEGE OF AGRICULTURE, DEPARTMENT OF SOIL AND PLANT NUTRITION, PIRACICABA, SAO PAULO STATE, ZIP CODE 13418-900, BRAZIL; FILHO, M. C. M. T.; GALINDO, F. S.; DINALLI, R. P.; GAZOLA, R. D. N. Nitrogen recovery, use efficiency, dry matter yield, and chemical composition of palisade grass fertilized with nitrogen sources in the Cerrado biome. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 9, p. 1330–1338, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.09.p7854>

EMBRAPA. **ILPF em Número**. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158636/1/2016-cpamt-ilpf-em-numeros.pdf>. Acesso em: 8 set. 2023.

FAO (org.). **Building a common vision for sustainable food and agriculture: principles and approaches**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014.

FAO, I. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum**. Rome, Italy: FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2023. (The State of Food Security and Nutrition in the World (SOFI) 2023). *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc3017en>. Acesso em: 10 out. 2023.

FAOSTAT. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 30 jan. 2023.

FARIAS, G. D.; DUBEUX, J. C. B.; SAVIAN, J. V.; DUARTE, L. P.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; ALVES, L. A.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; BREMM, C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 6, p. 39, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>

FILHO, J. M.; OLIVEIRA, C. M. G. de; CARAMORI, P. H.; NAGASHIMA, G. T.; HERNANDEZ, F. B. T. Cold tolerance of forage plant species. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 4, p. 1469–1476, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n4p1469>

FRANZLUEBBERS, A. J.; SAWCHIK, J.; TABOADA, M. A. Agronomic and environmental impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, Integrated Crop-Livestock System Impacts on Environmental Processes, p. 18–26, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>

GALINDO, F. S.; BUZETTI, S.; FILHO, M. C. M. T.; DUPAS, E.; LUDKIEWICZ, M. G. Z. Acúmulo de matéria seca e nutrientes no capim-mombaça em função do manejo da adubação nitrogenada. **Revista de Agricultura NeotropicalICAL**, v. 5, n. 3, p. 1–9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.32404/rean.v5i3.2132>

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 579–585, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.002>

GRABBER, J. H. How Do Lignin Composition, Structure, and Cross-Linking Affect Degradability? A Review of Cell Wall Model Studies. **Crop Science**, v. 45, n. 3, p. 820–831, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0191>

GUELF, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônomicas**, v. 157, p. 1–14, 2017.  
HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v. 208, p. 103295, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295>

JAHS, T.; EWEN, H.; KALTWASSER, H. Biodegradability of Urea-Aldehyde Condensation Products. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 11, n. 4, p. 155–159, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1026052314695>

JOHNSON, C. R.; REILING, B. A.; MISLEVY, P.; HALL, M. B. Effects of nitrogen fertilization and harvest date on yield, digestibility, fiber, and protein fractions of tropical grasses. **Journal of Animal Science**, v. 79, n. 9, p. 2439–2448, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/2001.7992439x>

JUNG, H. G.; CASLER, M. D. Maize Stem Tissues: Cell Wall Concentration and Composition during Development. **Crop Science**, v. 46, n. 4, p. 1793–1800, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.02-0085>

KOSCHECK, J. F. W.; ROMANZINI, E. P.; BARBERO, R. P.; DELEVATTI, L. M.; FERRARI, A. C.; MULLINIKS, J. T.; MOUSQUER, C. J.; BERCHIELLI, T. T.; REIS, R. A. How do animal performance and methane emissions vary with forage management intensification and supplementation? **Animal Production Science**, v. 60, n. 9, p. 1201, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/AN18712>

KRATSCH, H. A.; WISE, R. R. The ultrastructure of chilling stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 23, n. 4, p. 337–350, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00560.x>

LAFARGE, M. Reproductive tillers in cut tall fescue swards: differences according to sward age and fertilizer nitrogen application, and relationships with the local dynamics of the sward. **Grass and Forage Science**, v. 61, n. 2, p. 182–191, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00525.x>

LEITE, R. G.; CARDOSO, A. da S.; FONSECA, N. V. B.; SILVA, M. L. C.; TEDESCHI, L. O.; DELEVATTI, L. M.; RUGGIERI, A. C.; REIS, R. A. Effects of nitrogen fertilization on protein and carbohydrate fractions of Marandu palisadegrass. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94098-4>

LEMAIRE, G.; GASTAL, F. N Uptake and Distribution in Plant Canopies. *In*: LEMAIER, G. (org.). **Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. p. 3–43. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_1). Acesso em: 4 jul. 2023.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.-H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 614–624, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.005>

LEMAIRE, G.; MEYNARD, J. M. Use of the Nitrogen Nutrition Index for the Analysis of Agronomical Data. *In*: LEMAIER, G. (org.). **Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997. p. 45–55. *E-book*. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_2). Acesso em: 4 jul. 2023.

MA, Q.; QIAN, Y.; YU, Q.; CAO, Y.; TAO, R.; ZHU, M.; DING, J.; LI, C.; GUO, W.; ZHU, X. Controlled-release nitrogen fertilizer application mitigated N losses and modified microbial community while improving wheat yield and N use efficiency. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 349, p. 108445, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108445>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 1997.

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CASTILHOS, A. M. Sidedress Nitrogen Application Rates to Sorghum Intercropped with Tropical Perennial Grasses.

**Agronomy Journal**, v. 108, n. 1, p. 433–447, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.2134/agronj2015.0236>

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; COSTA, N. R.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; CASTILHOS, A. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CANTARELLA, H. Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, n. 2, p. 223–244, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-10040-1>

MCROBERTS, K. C.; PARSONS, D.; KETTERINGS, Q. M.; HAI, T. T.; QUAN, N. H.; BA, N. X.; NICHOLSON, C. F.; CHERNEY, D. J. R. Urea and composted cattle manure affect forage yield and nutritive value in sandy soils of south-central Vietnam.

**Grass and Forage Science**, v. 73, n. 1, p. 132–145, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1111/gfs.12289>

MEIRELLES, G. C.; HEINRICHS, R.; LIRA, M.; RIBEIRO VIRGÍLIO, I.; FELIPE MELO DOS SANTOS, L.; BONFIM CASSIMIRO, J.; LUIS RUFFO, M.; VIEGA SOARES FILHO, C.; MOREIRA, A. Ammonia volatilization and pasture yield of *Urochloa decumbens* fertilized with nitrogen sources. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2022. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/03650340.2022.2129049>

MORAES, A. D.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. D. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4–9, 2014.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>

MORAES, A. de; CARVALHO, P. C. de F.; CRUSCIOL, C. A. C.; LANG, C. R.; PARIZ, C. M.; DEISS, L.; SULC, R. M. Chapter 16 - Integrated Crop-Livestock Systems as a Solution Facing the Destruction of Pampa and Cerrado Biomes in South America by Intensive Monoculture Systems. *In*: LEMAIRE, G.; CARVALHO, P. C. D. F.; KRONBERG, S.; RECOUS, S. (org.). **Agroecosystem Diversity**. [S. l.]: Academic Press, 2019. p. 257–273. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00016-9>. Acesso em: 9 out. 2023.

MOTTET, A.; DE HAAN, C.; FALCUCCI, A.; TEMPIO, G.; OPIO, C.; GERBER, P. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. **Global Food Security**, v. 14, Food Security Governance in Latin America, p. 1–8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>

NASCIMENTO, H. L. B.; PEDREIRA, B. C.; SOLLENBERGER, L. E.; PEREIRA, D. H.; MAGALHÃES, C. A. S.; CHIZZOTTI, F. H. M. Herbage accumulation, canopy structure and tiller morphology of marandu palisadegrass growing in open pasture and in silvopasture. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 2, p. 339–352, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00590-7>

NOVAIS, R. F. D.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade Do Solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sbc, 2007.

OLIVEIRA, C. L. B. de; CASSIMIRO, J. B.; LIRA, M. V. da S.; BONI, A. da S.; DONATO, N. de L.; REIS, R. dos A.; HEINRICHS, R. Sugarcane Ratoon Yield and Soil Phosphorus Availability in Response to Enhanced Efficiency Phosphate Fertilizer. **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 2817, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112817>  
OLIVEIRA, C. L. B. de; CASSIMIRO, J. B.; SILVA, J. F. da; SILVA, M. B. P. da; BONINI, C. S. B.; HEINRICHS, R. Fertilidade do solo, adubação e a sustentabilidade da produção agropecuária. In: **IMAST 2023: IV International Meeting of Agrarian Science and Technology**. 4. ed. Dracena: Ladri, 2023. E-book. Disponível em: [https://www.dracena.unesp.br/Home/Servicos/Biblioteca/livrosfcat/livrodig\\_imast\\_2023.pdf](https://www.dracena.unesp.br/Home/Servicos/Biblioteca/livrosfcat/livrodig_imast_2023.pdf)

PAIVA, A. J.; PEREIRA, L. E. T.; SILVA, S. C. da; DIAS, R. A. P. Identification of tiller age categories based on morphogenetic responses of continuously stocked marandu palisade grass fertilised with nitrogen. **Ciência Rural**, v. 45, p. 867–870, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20120738>

PAIVA, A. J.; SILVA, S. C. D.; PEREIRA, L. E. T.; GUARDA, V. D.; PEREIRA, P. D. M.; CAMINHA, F. O. Structural characteristics of tiller age categories of continuously stocked marandu palisade grass swards fertilized with nitrogen. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 41, n. 1, p. 24–29, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000100004>

PAPA, G.; VARANASI, P.; SUN, L.; CHENG, G.; STAVILA, V.; HOLMES, B.; SIMMONS, B. A.; ADANI, F.; SINGH, S. Exploring the effect of different plant lignin content and composition on ionic liquid pretreatment efficiency and enzymatic saccharification of Eucalyptus globulus L. mutants. **Bioresource Technology**, v. 117, p. 352–359, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.065>

PARIZ, C. M. *et al.* Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 35–54, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>

PARIZ, C. M. *et al.* An Innovative Corn to Silage-Grass-Legume Intercropping System With Oversown Black Oat and Soybean to Silage in Succession for the Improvement of Nutrient Cycling. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fsufs.2020.544996>. Acesso em: 9 out. 2023.

PARIZ, C. M.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; BERGAMASCHINE, A. F.; ULIAN, N. D. A.; FURLAN, L. C.; MEIRELLES, P. R. D. L.; CAVASANO, F. A. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2029–2037, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600019>  
PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009, 2009.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, Â. M. C. **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. n. 2nd, p. 88, 1997.

REBONATTI, M. D.; CORDEIRO, C. F. dos S.; VOLF, M. R.; GOMES DA SILVA, P. C.; TIRITAN, C. S. Effects of silage crops between crop seasons on soybean grain yield and soil fertility in tropical sandy soils. **European Journal of Agronomy**, v. 143, p. 126685, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126685>

REETZ, H. F. **Fertilizers and their efficient use**. Paris: International Fertilizer industry Association, IFA, 2016.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 658–666, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>

ROSOLEM, C. A.; VICENTINI, J. P. T. M. M.; STEINER, F. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1507–1515, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500015>

RUGGIERI, A. C.; CARDOSO, A. da S.; ONGARATTO, F.; CASAGRANDE, D. R.; BARBERO, R. P.; BRITO, L. de F.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, A. A.; KOSCHECK, J. F. W.; REIS, R. A. Grazing Intensity Impacts on Herbage Mass, Sward Structure, Greenhouse Gas Emissions, and Animal Performance: Analysis of Brachiaria Pastureland. **Agronomy**, v. 10, n. 11, p. 1750, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111750>

SANDINI, I. E.; MORAES, A. D.; PELISSARI, A.; NEUMANN, M.; FALBO, M. K.; NOVAKOWISKI, J. H. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. **Ciência Rural**, v. 41, n. 8, p. 1315–1322, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000099>

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018. *E-book*. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094003>. Acesso em: 14 ago. 2019.

SBRISSIA, A. F.; DUCHINI, P. G.; ZANINI, G. D.; SANTOS, G. T.; PADILHA, D. A.; SCHMITT, D. Defoliation Strategies in Pastures Submitted to Intermittent Stocking Method: Underlying Mechanisms Buffering Forage Accumulation over a Range of Grazing Heights. **Crop Science**, v. 58, n. 2, p. 945–954, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.07.0447>

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. da. Compensação tamanho/densidade populacional de perfilhos em pastos de capim-marandu. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 35–47, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000100005>

SCHUSTER, M. Z.; PELISSARI, A.; DE MORAES, A.; HARRISON, S. K.; SULC, R. M.; LUSTOSA, S. B. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. Grazing intensities affect weed seedling emergence and the seed bank in an integrated crop–livestock system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 232, p. 232–239, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.005>

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. César. **Análises de Alimentos - Métodos Químicos e Biológicos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2002.

SILVA, P. C. G. da; TIRITAN, C. S.; ECHER, F. R.; CORDEIRO, C. F. dos S.; REBONATTI, M. D.; SANTOS, C. H. dos. No-tillage and crop rotation increase crop yields and nitrogen stocks in sandy soils under agroclimatic risk. **Field Crops Research**, v. 258, p. 107947, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107947>

SIMÕES, V. J. L. P.; DE SOUZA, E. S.; MARTINS, A. P.; TIECHER, T.; BREMM, C.; RAMOS, J. D. S.; FARIAS, G. D.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Structural soil quality and system fertilization efficiency in integrated crop-livestock system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 349, p. 108453, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108453>

SOIL SURVEY DIVISION. **Keys to Soil Taxonomy**. 12th. ed. Washinton, D.C.: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

TANAKA, K. S.; CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; MOMESSO, L.; COSTA, C. H. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CALONEGO, J. C. Nutrients released by Urochloa cover crops prior to soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 113, n. 3, p. 267–281, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09980-5>

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; BISSANI, C. A.; CAMARGO, F. A. O.; WIETHÖLTER, S. **Manual de Adubação e Calagem**. 10ª ed. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2004.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília - DF: Embrapa Solos, 2017. v. 3.  
TELLES, T. S.; REYDON, B. P.; MAIA, A. G. Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. **Land Use Policy**, v. 76, p. 124–129, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.053>

VAN SOEST, P. J. **Nutritional Ecology of the Ruminant**. [S. l.]: Cornell University Press, 1994.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

VIANA, M. C. M.; FREIRE, F. M.; FERREIRA, J. J.; MACÊDO, G. A. R.; CANTARUTTI, R. B.; MASCARENHAS, M. H. T. Adubação nitrogenada na produção e composição química do capimbraquiária sob pastejo rotacionado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1497–1503, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000700014>

VOLF, M. R.; CRUSCIOL, C. A. C.; CUSTÓDIO, C. C.; BOSSOLANI, J. W.; MACHADO, F. G.; WRUCK, F. J.; COSTA, C. H. M.; RIBEIRO, J. F.; SILVA, L. S. Interseeding of ruzigrass into soybean: Strategies to improve forage cultivation in no-till systems. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 66, n. 1, p. 16–24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2021.02.003>

VOLF, M. R.; CRUSCIOL, C. A. C.; KOVAR, J. L.; ROSOLEM, C. A. Unraveling the role of ruzigrass in soil K cycling in tropical cropping systems. **Nutrient Cycling in**

**Agroecosystems**, v. 126, n. 2, p. 181–194, 2023. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1007/s10705-023-10283-z>

WOODLEY, A. L.; DRURY, C. F.; YANG, X. Y.; PHILLIPS, L. A.; REYNOLDS, D. W.; CALDER, W.; OLOYA, T. O. Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 4, p. 1327–1341, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/saj2.20079>