

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Fertilizante Orgânico Processado a Partir de
Biomassa de Gliricídia: Eficiência Agronômica e
Ambiental**

Camilla Santos Reis de Andrade da Silva

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA –
CIÊNCIA DO SOLO**

**FERTILIZANTE ORGÂNICO PROCESSADO A PARTIR DE
BIOMASSA DE GLIRICÍDIA: EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E
AMBIENTAL**

CAMILLA SANTOS REIS DE ANDRADE DA SILVA

Sob orientação da Pesquisador
Bruno José Rodrigues Alves

e Coorientação do Pesquisador
Ednaldo da Silva Araújo

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutora**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia-Ciência do Solo, Área de
Concentração em Manejo do Solo e
Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Março de 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586f	Silva, Camilla Santos Reis de Andrade da, 1995- Fertilizante orgânico processado a partir de biomassa de folhas de gliricídia: eficiência agronômica e ambiental / Camilla Santos Reis de Andrade da Silva. - Seropédica, 2025. 80 f. : il. Orientador: Bruno José Rodrigues Alves. Coorientador: Ednaldo da Silva Araújo. Tese (Doutorado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2025. 1. Nitrogênio. 2. Sustentabilidade. 3. <i>Gliricidia sepium</i>. I. Alves, Bruno José Rodrigues 1966-, orient. II. Araújo, Ednaldo da Silva, 1974-, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo. IV. Título.
-------	---

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 5 / 2025 - CPGACS (12.28.01.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.016739/2025-22

Seropédica-RJ, 01 de abril de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-CIÊNCIA DO SOLO

CAMILLA SANTOS REIS DE ANDRADE DA SILVA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

TESE APROVADA EM: 31/03/2025.

Bruno José Rodrigues Alves. Dr. Embrapa Agrobiologia
(Orientador)

Adelson Paulo de Araujo. Dr. UFRRJ

Everaldo Zonta. Dr. UFRRJ

Caio de Teves Inácio. Dr. Embrapa Agrobiologia

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa Solos

(Assinado digitalmente em 03/04/2025 15:27)
ADELSON PAULO DE ARAUJO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DATS (11.39.00.35)
Matrícula: 1104775

(Assinado digitalmente em 01/04/2025 15:51)
EVERALDO ZONTA
DIRETOR DE INSTITUTO - TITULAR
IA (12.28.01.21)
Matrícula: 2213075

(Assinado digitalmente em 04/04/2025 10:04)
BRUNO JOSE RODRIGUES ALVES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 681.282.827-00

(Assinado digitalmente em 05/04/2025 11:15)
DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 030.175.957-06

(Assinado digitalmente em 02/04/2025 08:31)
CAIO DE TEVES INÁCIO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 028.933.757-74

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **5**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data
de emissão: **01/04/2025** e o código de verificação: **6fe3769b1a**

AGRADECIMENTOS

A Deus que me ama e me abençoa todos os dias da minha vida.

À minha família que amo muito e são meu alicerce!!! Meu esposo, pais, irmãs e todos meus amigos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por me proporcionar um ensino público e de qualidade desde o ensino médio, técnico em agroecologia, graduação, especialização, mestrado e por fim, finalizando o doutorado.

Agradeço à Embrapa Agrobiologia e a Fazendinha Agroecológica Km 47 por me proporcionarem estar em contato com a pesquisa desde a minha iniciação científica.

A todos os professores do PPGA-CS por ensinarem conteúdos que fizeram diferença na minha trajetória profissional e acadêmica.

Ao grupo de pesquisa GECIN, pelas conversas, discussões sobre a pesquisa. E, pelo carinho de sempre.

Ao meu orientador Bruno Alves pela ajuda, incentivo e por ter aceitado minha pesquisa na área da agricultura orgânica. Ao meu coorientador Ednaldo Araújo por seu constante incentivo na minha trajetória na pesquisa e no ensino. Sua orientação foi fundamental para que eu superasse minhas inseguranças e acreditasse em meu potencial.

A todos os supracitados os meus sinceros agradecimentos!

BIOGRAFIA

Camilla Santos Reis de Andrade da Silva nasceu na cidade do Rio de Janeiro (RJ), em 16 de fevereiro de 1995. É técnica em Agroecologia pelo Colégio Técnico da Universidade Rural (2012). Ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro no curso de Licenciatura em Ciências Agrícolas no segundo semestre de 2013, onde foi Bolsista de Iniciação à Docência (2014-2016), bolsista de Iniciação Científica pela Embrapa Agrobiologia (2017-2018) e Monitora da disciplina de Didática Geral (2017). Diplomou-se em 2017. Em setembro de 2019 concluiu a especialização em Estatística Aplicada/UFRRJ. Em outubro de 2020, tornou-se Mestra em Agronomia - Ciência do Solo na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Em abril de 2021 iniciou o doutorado no Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo na mesma universidade.

RESUMO GERAL

SILVA, Camilla Santos Reis de Andrade da. **Fertilizante orgânico processado a partir de biomassa de folhas de gliricídia: Eficiência agrônômica e ambiental.** 2025. 80f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Os sistemas orgânicos de produção restringem o uso de fertilizantes sintéticos, o que limita a disponibilidade de insumos padronizados e de baixo custo para os produtores. Nesse cenário, o fertilizante N-verde, obtido pela peletização da biomassa moída de gliricídia (*Gliricidia sepium*), surge como uma alternativa promissora, por ser uma fonte renovável com teor adequado de nitrogênio (N). A tese foi estruturada em três capítulos para avaliar a viabilidade econômica e ambiental do N-verde. O Capítulo I teve como objetivo determinar o arranjo espacial que maximiza a produção de biomassa de gliricídia, testando três espaçamentos entre plantas (0,3 m, 0,5 m e 1,0 m) combinados com fileiras simples ou dupla. O Capítulo II investigou a eficiência agrônômica de N verde, e o seu desempenho foi comparado com cama de aviário e torta de mamona em ciclos consecutivos de alface crespa, durante dois anos agrícolas. Por sua vez, o objetivo do Capítulo III foi quantificar as perdas de N por volatilização de amônia (NH₃) e emissão de óxido nitroso (N₂O) dos referidos fertilizantes do capítulo anterior. Os estudos de campo foram realizados aéreas experimentais localizadas no município de Seropédica (RJ). Os resultados demonstraram que o espaçamento de 0,3 m em fileiras duplas proporcionou maior acúmulo de biomassa, com maior proporção de folhas e caules finos, maximizando a eficiência de uso da área para produção do fertilizante. A dose de 250 kg N ha⁻¹ de N-verde foi a que resultou em maior produtividade de alface, sendo equivalente à adubação com cama de aviário e torta de mamona e superior às recomendações do manual de adubação do Estado do Rio de Janeiro. Além disso, o efeito residual do N-verde forneceu produtividade em níveis previstos pelo manual. O fator de emissão de N₂O do N-verde foi cinco vezes menor que o valor padrão do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, enquanto as emissões de N₂O e NH₃ pela torta de mamona foram, no mínimo, dez vezes superiores às do N-verde e da cama de aviário compostada. A aplicação superficial seguida de incorporação manual nos canteiros resultou em baixas perdas de NH₃ e N₂O. Portanto, a pesquisa contribui com avanços no estudo dessa fonte de N, posicionando o N-verde como uma alternativa economicamente viável e ambientalmente vantajosa para a agricultura orgânica e agroecológica, por proporcionar alta produtividade com baixas emissões de gases de efeito estufa. A recomendação de arranjo de plantio eleva a produção de biomassa, alcançando cerca de 20 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de biomassa seca aérea, mesmo em solos de baixa fertilidade natural.

Palavras-chave: Nitrogênio. Sustentabilidade. *Gliricidia sepium*.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Camilla Santos Reis de Andrade da. **Processed organic fertilizer derived from *Gliricidia* leaf biomass: Agronomic and environmental efficiency.** 2025. 80p. Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

Organic production systems restrict the use of synthetic fertilizers, which limits the availability of standardized and low-cost inputs for farmers. In this context, the N-verde fertilizer, produced by pelletizing ground biomass of *Gliricidia sepium*, emerges as a promising alternative, as it is a renewable source with an adequate nitrogen (N) content. This dissertation is structured into three chapters to evaluate the economic and environmental feasibility of N-verde. Chapter I aimed to determine the spatial arrangement that maximizes gliricidia biomass production, testing three plant spacings (0.3 m, 0.5 m, and 1.0 m) combined with single or double rows. Chapter II investigated the ideal N-verde rate and compared its performance to poultry litter and castor bean cake in consecutive cycles of crisp lettuce over two growing seasons. Chapter III, in turn, aimed to quantify N losses through ammonia (NH₃) volatilization and nitrous oxide (N₂O) emissions from the fertilizers evaluated in the previous chapter. Field studies were conducted in experimental areas located in the municipality of Seropédica (RJ), Brazil. The results showed that the 0.3 m spacing in double rows provided greater biomass accumulation, with a higher proportion of leaves and fine stems, maximizing land use efficiency for fertilizer production. The rate of 250 kg N ha⁻¹ of N-verde resulted in the highest lettuce yield, being equivalent to fertilization with poultry litter and castor bean cake, and superior to the recommendations of the fertilizer manual of the State of Rio de Janeiro. Moreover, the residual effect of N-verde maintained yields within the levels predicted by the manual. The N₂O emission factor of N-verde was five times lower than the default value set by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), while N₂O and NH₃ emissions from castor bean cake were at least ten times higher than those from N-verde and composted poultry litter. Surface application followed by manual incorporation into the beds resulted in low NH₃ and N₂O losses. Therefore, this research advances the study of this nitrogen source, positioning N-verde as an economically viable and environmentally advantageous alternative for organic and agroecological agriculture, by providing high productivity with low greenhouse gas emissions. The recommended planting arrangement enhances biomass production, reaching approximately 20 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of aerial dry biomass, even in soils with low natural fertility.

Keywords: Nitrogen. Sustainability. *Gliricidia sepium*.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Distribuição do número de agricultores orgânicos por região do Brasil. Dados: Cadastro nacional de produtores orgânicos, 2023. Legenda: CA: Certificação por auditoria; OPAC: Certificação da qualidade orgânica; OCS: Certificação por controle social. Fonte: Mapa, 2023.5
- Figura 2.** Representação gráfica da organização do arranjo das árvores espaçadas e em dois tipos de fileiras no campo experimental. 18
- Figura 3.** Detalhe da aérea experimental, medição e pesagem da planta de gliricídia. Seropédica - RJ. Fonte: Acervo fotográfico da Autora. 19
- Figura 4.** Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do espaçamento entre plantas no primeiro ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2022). As comparações foram feitas dentro de cada coleta e médias seguidas de letras diferentes indicam efeito do espaçamento entre plantas, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 20
- Figura 5.** Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do arranjo de fileiras no primeiro ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2022). As comparações foram feitas dentro de cada coleta, e médias com letras diferentes indicam efeito do tipo de fileira, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Elaborado pela Autora. 21
- Figura 6.** Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do espaçamento entre plantas no segundo ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2023). As comparações foram feitas dentro de cada coleta e médias seguidas de letras diferentes indicam efeito do espaçamento entre plantas, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 22
- Figura 7.** Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do arranjo de fileiras no segundo ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2023). As comparações foram feitas dentro de cada coleta, e médias com letras diferentes indicam efeito do tipo de fileira, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 23
- Figura 8.** Quantidade de nitrogênio acumulado (kg ha^{-1}) na biomassa aérea da gliricídia na segunda coleta de 2023. Médias representadas por letras maiúsculas indicam o efeito das fileiras dentro de cada nível de espaçamento, enquanto letras minúsculas indicam o efeito do espaçamento dentro do nível de cada fileira, conforme o teste de Tukey, com 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 24
- Figura 9.** Proporções de caule (%) e folha (%) da gliricídia mensuradas no espaçamento 0,3 m em fileiras simples e dupla em 2022(A, B e C) e 2023 (C, D e F). Ausência de letras indica que não houve diferença estatística pelo teste F ($p>0,05$). Fonte: Elaborado pela Autora. 26
- Figura 10.** Dados climáticos do estudo de campo nos anos: 2022(A) e 2023 (B). Os dados da precipitação e, temperaturas máximas e mínimas do ar foram obtidas da estação climática automática Ecologia do INMET. Seropédica, RJ, Brasil. Fonte: Elaborado pela Autora. 33
- Figura 11.** Massa fresca de plantas de alface (g planta^{-1}) submetidas a doses crescentes de N-verde em produção orgânica na adubação de plantio. A: 1º ciclo (2022) e B: 1º ciclo (2023). As barras nos pontos que representam as médias indicam o erro padrão. Fonte: Elaborado pela Autora. 38

- Figura 12.** Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fontes de N na dose de 100 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2022. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento, diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 39
- Figura 13.** Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos nas doses de 300 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2022. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento, diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora. 40
- Figura 14.** Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos na dose de 100 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2023. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora. 41
- Figura 15.** Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos na dose de 300 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2023. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora. 42
- Figura 16.** Eficiência agronômica e de recuperação aparente de fontes de N na doses de 100 e 300 kg N ha⁻¹ na adubação de plantio da hortaliça em 2022(A e B) e 2023(C e D). Médias representadas por letras maiúsculas indicam o efeito das doses, enquanto letras minúsculas indicam o efeito do fertilizante dentro do nível de cada dose, conforme o teste de Tukey, com 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora. 44
- Figura 17.** Dados diários de temperatura do ar e do solo (C°) e eventos de precipitação em (mm) em função do ano agrícola que foi realizada a adubação de fertilizantes orgânicos. Seropédica, RJ, Brasil. Fonte: Elaborado pela Autora. 58
- Figura 18.** Fluxos de N-N₂O µg m⁻² dia⁻¹. Faixas em transparência representam o erro padrão da média (n=5). CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona. Fonte: Elaborado pela Autora. 59
- Figura 19.** (A) Emissão acumulada de N-N₂O (mg m⁻²) em função dos dias após adubação de plantio com fertilizantes orgânicos na cultura da alface. Pontos representam os valores observados (n=5). Linha preta representa o modelo logarítmico ajustado, faixa em transparência representam as bandas de confiança a 95%. Dados transformados por log (N-N₂O). (B) Análise dos parâmetros dos modelos entre os tratamentos. Linhas verticais representam o intervalo de confiança a 95%. O teste de comparação de médias utilizado foi o Teste de Hipóteses Lineares Generalizadas. Diferença ao nível de significância p <0,05. CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona. Fonte: elaborado pela Autora. 60
- Figura 20.** Emissão acumulada de N-NH₃ (mg m⁻²) em função dos dias após adubação de plantio com fertilizantes orgânicos na cultura da alface. Pontos representam os valores observados (n=5). Linha preta representa o modelo logarítmico ajustado, faixa em transparência representam as bandas de confiança a 95%. (B) Análise dos parâmetros dos modelos entre os tratamentos. Linhas verticais representam o intervalo de confiança a 95%. O teste de comparação de médias utilizado foi o Teste de Hipóteses Lineares Generalizadas. Diferença ao nível de significância p <0,05. CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona. 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de C orgânico total (COT), pH, Al^{+3} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P extraível (Mehlich 1) e K^{+} no solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm, que foi cultivada com as árvores de gliricídia, Seropédica, RJ.	17
Tabela 2. Cronologia das coletas e período de rebrota de árvores de gliricídia, realizadas em 2022 e 2023.....	19
Tabela 3. Desempenho médio da alface ao longo de dois anos agrícolas em cultivos sucessivos, adubada com diferentes fontes de nitrogênio na dose de 100 kg N ha^{-1}	46
Tabela 4. Desempenho médio da alface ao longo de dois anos agrícolas em cultivos sucessivos, adubada com diferentes fontes de nitrogênio na dose de 300 kg N ha^{-1}	47
Tabela 5. Teor de nitrogênio (%) e a Relação C/N e quantidade aplicada dos fertilizantes orgânicos adotados no estudo nos anos de monitoramento. Seropédica, RJ, Brasil.	54
Tabela 6. Fatores de emissão de NH_3 e N_2O a partir da aplicação de fertilizantes orgânicos na produção orgânica de alface em 2022 e 2023, na dose de $100 \text{ kg de N ha}^{-1}$. Seropédica, RJ, Brasil.....	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA GERAL	3
2.1 Aspectos Socioeconômicos da Agricultura Orgânica.....	3
2.2 Crescimento do Mercado de Fertilizantes Orgânicos	5
2.3 Fatores que Influenciam a Eficiência Agronômica na Fertilização Orgânica	6
2.4 Utilização de Leguminosa Arbórea <i>Gliricidia sepium</i> para Adubação Verde	9
2.5 Histórico de Pesquisa sobre o Fertilizante a Base Biomassa de <i>Gliricidia</i> (N-Verde) ..	10
3. CAPÍTULO I ARRANJO ESPACIAL DA <i>GLIRICIDIA SEPIUM</i> AUMENTA A PRODUÇÃO DE BIOMASSA RICA EM NITROGÊNIO EM SOLO FRÁGIL NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL.....	12
3.1 RESUMO.....	13
3.2 ABSTRACT.....	14
3.3 INTRODUÇÃO	15
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	17
3.4.1 Localização, clima da área de estudo e análise de solo.....	17
3.4.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental	17
3.4.3 Instalação do experimento, tratos culturais e corte das plantas de gliricídia	18
3.4.4 Análises estatísticas.....	19
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
3.6 CONCLUSÕES	27
4. CAPÍTULO II EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTE A BASE DE BIOMASSA DE <i>GLIRICIDIA</i> NA PRODUÇÃO ORGÂNICA DE ALFACE.....	28
4.1 RESUMO.....	29
4.2 ABSTRACT.....	30
4.3 INTRODUÇÃO	31
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	33
4.4.1 Localização, clima da área de estudo e análise de solo.....	33
4.4.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental	33
4.4.3 Etapas na condução da produção da alface	34
4.4.4 Análises estatísticas.....	35
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.5.1 Resposta da cultura da alface a doses crescentes de N-verde	36
4.5.2 Comparação de fertilizantes orgânicos na produção de alface	38
4.5.3 Desempenho agronômico das fontes de N em dois anos de avaliação consecutiva	44
4.6 CONCLUSÕES	48

5. CAPÍTULO III EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E AMÔNIA DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS NA PRODUÇÃO DE ALFACE	49
5.1 RESUMO	50
5.2 ABSTRACT	51
5.3 INTRODUÇÃO	52
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	54
5.4.1 Área de estudo, delineamento experimento e descrição dos tratamentos	54
5.4.2 Emissão de N ₂ O no cultivo de alface em dois ciclos sucessivos	55
5.4.3 Volatilização de NH ₃	55
5.4.4 Análise estatística	56
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.6 CONCLUSÕES	65
6. CONCLUSÕES GERAIS	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO GERAL

As normas para produção e comercialização de alimentos orgânicos foram criadas para permitir a certificação das práticas agrícolas, de modo a oferecer um produto diferenciado e garantido para o mercado consumidor. A Lei nº 10.831 é pioneira na regulamentação sobre a agricultura orgânica no Brasil, incorporando princípios da agroecologia, e evidenciando os benefícios socioambientais (SILVA et al., 2024b).

Os princípios da agroecologia adotados na agricultura orgânica se traduzem em práticas de manejo que priorizam a saúde do solo, da água, das plantas e animais, e do ar. Os princípios ecológicos também são enfatizados, com destaque para reciclagem de nutrientes, energia e materiais, e a diversificação de espécies vegetais (WILLER, 2023).

No Brasil, a agricultura orgânica ocupa uma área relativamente pequena, mas está em expansão significativa, com um crescimento de produtos orgânicos a cada ano (GALHARDO et al., 2018). Em relação aos produtos, a olericultura representa mais de 70% da produção de alimentos orgânicos (SILVA et al., 2020; SEDIYAMA et al., 2014).

Apesar da sua efetiva contribuição social, econômica, alimentar e ambiental, a agricultura orgânica enfrenta diversos desafios, que demandam especial atenção da pesquisa científica. Um desafio notável é a carência de fertilizantes nitrogenados de baixo custo, haja vista a grande demanda por N normalmente verificada pela maioria das culturas comerciais, especialmente as olerícolas (SILVA et al., 2024b).

A utilização dos adubos verdes, principalmente as espécies leguminosas, é uma estratégia comum para o suprimento de N para as culturas comerciais em unidades de produção orgânica (BERGSTRAND, 2022). Determinadas espécies vegetais da família Fabaceae são eficientes em acumular grandes quantidades de N via fixação biológica de N₂ (FBN), e de disponibilizar esse macronutriente no solo por meio da decomposição de seus resíduos. Uma das espécies que mostra um grande potencial na produção orgânica é a *Gliricidia sepium*, com excelente desempenho como adubo verde para nutrição das plantas (ALMEIDA et al., 2008; GONÇALVES JÚNIOR, 2017).

A gliricidia, cultivável na maior parte do território nacional, destaca-se por seu elevado potencial de FBN, estimado em cerca de 80% do total de N que acumula em sua biomassa (PAULINO et al., 2009). Suas folhas apresentam concentrações de N da ordem de 4%, o que é um ponto favorável para fertilização (ARAÚJO et al., 2024), além de apresentar alta produção anual de biomassa e capacidade de rebrota (CHAVES et al., 2022; LEAL et al., 2013). Um dos adubos mais utilizados na produção orgânica, a cama de aviário estabilizada apresenta concentrações de N similares às das folhas de gliricidia (FRANZ et al., 2020). Essa característica permitiu que os estudos de Almeida et al. (2007, 2008) fossem bem-sucedidos no uso de folhas moídas de gliricidia como adubo para a produção orgânica de alface, com ganhos significativos de produtividade.

Os resultados positivos com folhas moídas levaram a um aprofundamento das pesquisas com essa leguminosa, visando ajustar e transformar esse material vegetal em fertilizante (ARAÚJO et al., 2024; ALMEIDA et al., 2007; 2012). Um dos problemas verificados foi a necessidade de manusear o pó, difícil de armazenar, sendo suscetível a perdas na aplicação, além da possibilidade de causar alergia. Dessa forma, Santos (2017) utilizou o processo de peletização, técnica bastante adotada na indústria de adubos e sementes, para criar um fertilizante à base de folhas moídas de gliricidia, denominado N-verde. Por esse processo, é possível padronizar o produto, o que permite homogeneidade da aplicação no solo e otimização do armazenamento, e comercialização em grande escala.

Embora o N-verde tenha surgido para agregar e diminuir a limitação ao acesso às fontes de N como a cama de aviário, esterco e torta de mamona, a sua eficiência como fertilizante

ainda não é bem estabelecida, dificultando uma recomendação de uso por produtores. Desta forma, é importante verificar como esse novo produto se comporta em termos comparativos com as fontes já conhecidas pelos produtores.

Outro ponto de alta relevância na atualidade é saber sobre os impactos ambientais associados à aplicação deste fertilizante, especialmente por ser uma fonte de N. Perdas ambientais na forma de NH_3 , assim como as emissões de N_2O , um potente gás de efeito estufa, precisam ser avaliadas segundo a proposta de uso do N-verde. Além disso, sendo um produto que pode ganhar escala comercial, é importante que a produção de matéria-prima (biomassa de gliricídia) seja eficiente, visando otimizar ao máximo o uso da terra. Nesse contexto, é essencial saber o potencial máximo da produção de biomassa a partir do espaçamento e o número adequado de fileiras no plantio da gliricídia (ARAÚJO et al., 2024).

Assim, as hipóteses deste estudo são: i) que o arranjo espacial de gliricídia pode ser otimizado para máxima produção de biomassa vegetal; ii) que o fertilizante de biomassa de gliricídia, fornecido em pellets (N-verde), é capaz de suprir a demanda de N para a produção orgânica de olerícolas, com eficiência agrônômica igual ou superior ao uso de cama de aviário ou torta de mamona, fontes mais comuns de N, e ii) O fertilizante N-verde é capaz de proporcionar uma produção de alface aliada a, relativamente, menores perdas de NH_3 e emissões de N_2O .

Diante disso, a tese foi dividida em três capítulos. No Capítulo I, “Produção de biomassa aérea de gliricídia em resposta ao arranjo de plantio”, o objetivo foi definir o espaçamento e a disposição de fileiras para o plantio da gliricídia, visando identificar o arranjo espacial ideal para a produção de biomassa aérea. No Capítulo II, “Eficiência agrônômica de fertilizante a base de biomassa de gliricídia na produção orgânica de alface”, o objetivo foi avaliar o desempenho agrônômico do fertilizante N-verde na produção orgânica de alface, ao longo de dois ciclos consecutivos, e compará-lo com duas fontes orgânicas amplamente utilizadas: a torta de mamona e a cama de aviário compostada. No Capítulo III, “Emissão de óxido nitroso e amônia de fertilizantes orgânicos na produção de alface”, o objetivo foi quantificar as emissões de N_2O e NH_3 decorrentes da aplicação do N-verde, comparando com a torta de mamona e a cama de aviário compostada.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos Socioeconômicos da Agricultura Orgânica

A Lei 10.831 orienta sobre as práticas agrícolas que devem ser seguidas pelos agricultores, bem como aborda os princípios agroecológicos por trás de cada prática de manejo em função dos benefícios para o meio ambiente. A definição da Agricultura orgânica é dada em seu artigo 1º da Lei nº 10.831:

Art. 1º: Considera-se sistema orgânico de produção agropecuária todo aquele em que se adotam técnicas específicas, mediante a otimização do uso dos recursos naturais e socioeconômicos disponíveis e o respeito à integridade cultural das comunidades rurais, tendo por objetivo a sustentabilidade econômica e ecológica, a maximização dos benefícios sociais, a minimização da dependência de energia não renovável, empregando, sempre que possível, métodos culturais, biológicos e mecânicos, em contraposição ao uso de materiais sintéticos, a eliminação do uso de organismos geneticamente modificados e radiações ionizantes, em qualquer fase do processo de produção, processamento, armazenamento, distribuição e comercialização, e a proteção do meio ambiente.

O crescimento da agricultura orgânica foi impulsionado principalmente a partir da criação da Lei em 2003, com os instrumentos necessários para assegurar ao consumidor a qualidade do produto orgânico, e gerou bons resultados notadamente sobre o reconhecimento dos sistemas de certificação da qualidade orgânica, a OPAC (Organismo Participativo de Avaliação da Conformidade orgânica), destacando o Brasil como referência mundial sobre a criação desta forma de certificação (CANDIOTTO, 2018; GALHARDO et al., 2018).

A partir desta regulamentação, outras leis e instruções normativas foram elaboradas e atualizadas. Posteriormente, em 2009, foram publicadas as instruções normativas que regulamentaram os diferentes escopos produtivos, adequando as normas técnicas a um país de clima tropical e de baixa renda, bem como atualizações sobre os procedimentos para registro de produtos fitossanitários e o desenvolvimento do selo oficial para OPAC (SILVA e SILVA, 2016).

Políticas públicas e leis para a agricultura familiar e para as comunidades tradicionais foram sendo elaboradas em função do crescimento e da pressão dos apoiadores da agroecologia e agricultura orgânica, como pauta as modificações no Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf) e a Lei da Agricultura Familiar (Lei No. 11.326) que institucionalizou a categoria *agricultor familiar* (SAMBUICHI et al., 2017).

Porém, ainda não havia uma política específica que respaldasse a produção de base agroecológica. Visto isso, a pauta da IV Marcha das Margaridas, em 2011, reivindicou ações em favor do desenvolvimento de um plano nacional para apoiar ações no campo da agroecologia e agricultura orgânica (ANA, 2011). A demanda apresentada pela IV Marcha das Margaridas foi atendida pelo governo brasileiro, e a resposta se deu por meio da criação da Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (PNAPO) (MCKAY e NEHRING, 2014), sendo considerado um dos principais instrumentos de política no país para agroecologia e reconhecido internacionalmente pelo pioneirismo na implementação de uma política pública dessa natureza. (FAO, 2022).

A PNAPO foi criada, em 2012, para fomentar ações governamentais direcionadas para promoção da transição agroecológica e a produção orgânica no país (DA COSTA et al., 2017; SANTOS et al., 2017). A partir do PNAPO foi construído o PLANAPO – Plano Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica - para orientar as ações governamentais para investimentos estratégicos a partir dos vários ministérios que compõem a Câmara Intergovernamental de Agroecologia e Produção Orgânica (CIAPO) (SANTOS et al., 2017).

Outras instituições também atuam efetivamente no incentivo à agricultura familiar de base agroecológica, tendo como referência os programas de compras institucionais - Programa de Aquisição de Alimentos (PAA) e o de Alimentação Escolar (PNAE) - que viabilizam oportunidades de mercado para os agricultores familiares. O PAA adquire os produtos orgânicos e agroecológicos de base familiar com preços diferenciados acima do valor dos produtos convencionais, em até 30% (MOURA et al., 2017).

Assim como o PAA, o PNAE também prioriza a aquisição de alimentos orgânicos e/ou agroecológicos, remunerando em até 30% a mais – em relação ao produto convencional – os agricultores familiares que vendem alimentos orgânicos ao programa. E, pelo menos 30% dos recursos destinados à compra de alimentos para a merenda escolar devem ser investidos na aquisição de produtos da agricultura familiar (SANTOS et al., 2017).

A finalidade dos programas – PNAE; PAA; PNAPO - é estimular a transição da agricultura familiar para práticas de produção orgânica. Estudos de Eberle et al. (2022), Froehlich et al. (2018), Sambuichi et al. (2017), Vogt et al. (2022) já evidenciaram benefícios destas medidas concedidas pelos programas sobre o desenvolvimento e melhoria do comércio de produtos orgânicos certificados, como o aumento do número de produtores orgânicos, aumento de áreas agrícolas certificadas ou em transição orgânica, bem como o aumento no consumo por alimentos orgânicos. Ações construídas descritas refletiram positivamente no país, um exemplo disso a liderança do Brasil sobre o mercado de alimentos orgânicos na América Latina (ESTEVEES et al., 2021).

Apesar da agricultura brasileira ser dominada e caracterizada pelas monoculturas de commodities de exportação, SAMBUICHI et al. (2017) destacaram em seu estudo a importância da legislação e a institucionalização de políticas públicas ao projetar o Brasil internacionalmente como um dos países que mais avançaram em favor da produção e comercialização orgânica. Visto isso, mesmo que em passos lentos, é notório a capacidade do país em alcançar a liderança mundial sobre a produção orgânica (VILELA et al., 2019).

Haja visto o potencial de crescimento do mercado brasileiro de orgânicos, de acordo com MAPA (2020), entre os anos de 2012 e 2019, houve uma alta sobre o número de produtores orgânicos cadastrados, tendo um salto de 5,9 mil para 17,7 mil (Figura 1). Concomitante, também cresceu o número de unidades de produção orgânica no Brasil, saindo de 5,4 mil (2010), para mais de 22 mil (2018). O cadastro Nacional de Produtores Orgânicos do Mapa (2023) quantificou 25.097 produtores, distribuídos em todas as regiões brasileiras (Figura 1).

Dentre as regiões brasileiras, a região Sul se destaca como a de maior consumo de alimentos orgânicos e maior número de produtores e unidades agrícolas orgânicas (VILELA, 2019). Os cinco estados com maiores números destas referidas unidades são Paraná, Rio Grande do Sul, São Paulo, Santa Catarina e Piauí, que representavam aproximadamente 54% do total de unidades de produção no país.

Em relação aos alimentos orgânicos mais produzidos por região no Brasil, segundo o MAPA (2021), frutas tropicais e nativas, ervas medicinais, especiarias e extratos de plantas são mais comercializados na região Norte. No Nordeste, são destacadas as frutas tropicais, extratos vegetais, ervas e temperos orgânicos, mel e derivados. No Centro-Oeste são principalmente frutas, leite e derivados, carnes e feijões tropicais. No Sudeste, destacam-se as hortaliças (principalmente alface e cenoura), laranja, banana, leite, café, açúcar mel, galinhas e ovos. E no Sul, são mencionados vegetais de clima temperado, frutas, grãos, mate e derivados (VILELA et al., 2019).

Estima-se que o mercado de alimentos orgânicos no Brasil tenha movimentado cerca de 4 bilhões de reais em 2018 (MAPA, 2023). Boa parte desta expansão foi em função do aumento dos consumidores com desejo de consumir alimentos orgânicos. Eberle et al. (2022) destacam que as motivações para obter produtos orgânicos variam de acordo com valores culturais,

morais, éticos, sociais, nutricionais e financeiros, mas principalmente, com a questão da saúde e meio ambiente (OLIVEIRA et al., 2022).

Todavia, o maior custo dos produtos orgânicos em relação aos convencionais - por causa do aumento dos custos de produção e certificação - limita o acesso a esses alimentos para consumidores de menor poder aquisitivo (CANDIOTTO, 2018). Sendo assim, são recomendados feiras e circuitos curtos de comercialização. Outra dificuldade é expandir a distribuição e acessar mercados internacionais. Embora a demanda nacional esteja crescendo, ainda há espaço para melhorias no alcance de uma base de consumidores mais ampla e na exploração de oportunidades de exportação (SANTOS et al., 2017).

Em síntese, o mercado de produtos orgânicos no Brasil está experimentando o crescimento e desenvolvimento significativos, impulsionados pelo aumento da conscientização e demanda do consumidor, bem como através de regulamentos e programas de apoio para promover o crescimento do setor. No entanto, persistem desafios para reduzir o custo de produção e assim diminuir o preço dos alimentos, insumos agrícolas adaptados para esse sistema orgânico e agroecológico (EBERLE et al., 2022; ESTEVES et al., 2021).

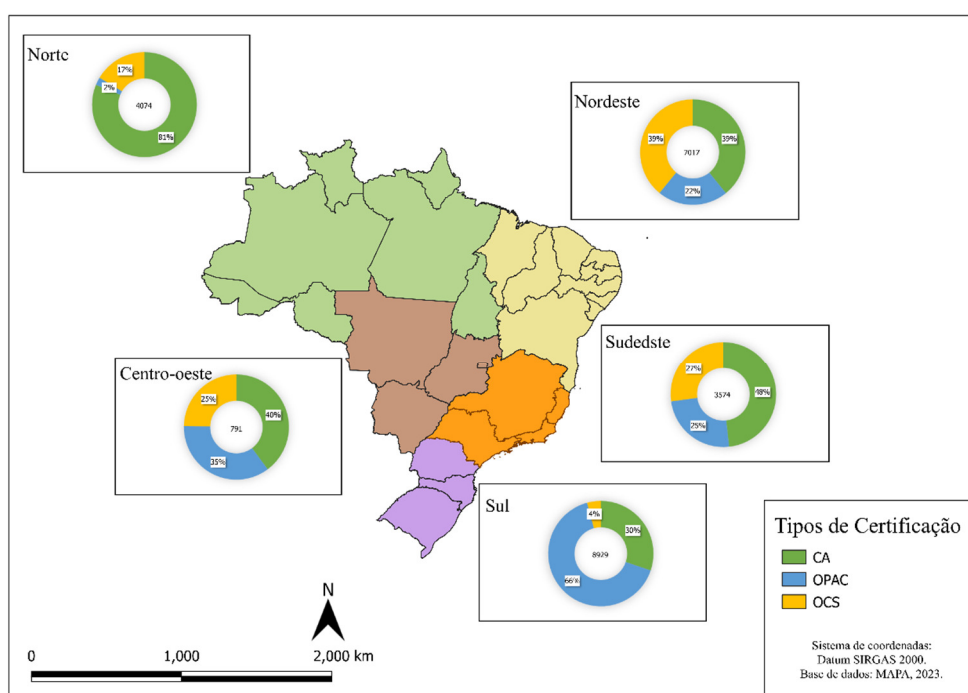


Figura 1. Distribuição do número de agricultores orgânicos por região do Brasil. Dados: Cadastro nacional de produtores orgânicos, 2023. Legenda: CA: Certificação por auditoria; OPAC: Certificação da qualidade orgânica; OCS: Certificação por controle social. Fonte: Mapa, 2023.

2.2 Crescimento do Mercado de Fertilizantes Orgânicos

A adubação é uma etapa essencial no manejo agrícola, independentemente do sistema de produção adotado. No caso dos sistemas orgânicos, a disponibilidade de fontes de N é um desafio significativo. Os insumos permitidos pela legislação orgânica geralmente são mais caros e têm uma eficiência agrônômica mais baixa em comparação com os fertilizantes sintéticos convencionais (ALMEIDA et al., 2008).

Assim, uma das alternativas para mudar esse cenário, é o desenvolvimento de estratégias de manejo baseadas na elaboração de novos fertilizantes nitrogenados para nutrição de plantas,

com baixas perdas de N para o ambiente e que condicionem rendimentos satisfatórios de produção (GOULART, 2020). Os fertilizantes nitrogenados permitidos pela legislação orgânica e mais comercializados no Brasil, são a torta de mamona, bokashi e esterco bovino (ZONTA et al., 2021). Já para fertilizantes de base de fósforo e potássio, é proibido o uso de materiais de alta solubilidade, como superfosfatos simples e triplo. Mas é permitido o uso de fosfato de rocha, termofosfato, sulfato de potássio, pós de rocha, entre outros (BRASIL, 2003). Segundo Zonta (2021), os custos com adubação podem chegar a 50% numa unidade de produção, mas além do aspecto econômico, tem a questão ambiental das perdas de N para o ambiente. O que reforça a importância de ter um manejo de fertilizantes em relação a indicação adequada de dose, época e forma de aplicação.

Tendo em vista este cenário, o mercado de fertilizantes alternativos cresceu bastante em função do aumento da demanda para pequenos agricultores, mas também devido às tendências agrícolas atuais de minimizar o uso de fertilizantes minerais (ZONTA, 2021). Somado a isso, existe uma crescente busca de alternativas a estes insumos sintéticos devido aos altos custos de adubação, suscetível à oscilação de preço no mercado, contaminação ambiental e aplicações inadequadas que levam à degradação da qualidade do solo. Esse cenário acarreta o interesse constante por fontes alternativas de nutrientes e menos sensíveis ao mercado de energia, beneficiando o comércio de fertilizantes alternativos (ABISSOLO, 2023).

O mercado de fertilizantes orgânicos e biofertilizantes tem apresentado crescimento expressivo. Segundo o Anuário Abisolo (2025), o setor registrou crescimento médio anual de 21% nos últimos três anos, superando a média global e impulsionado pela expansão da agricultura orgânica e do marco legal dos bioinsumos (Lei nº 15.070/2024). Esta legislação simplifica processos de registro e fortalece a segurança jurídica para produção, comercialização e uso de bioinsumos, incluindo fertilizantes de base orgânica. Apesar dos avanços, ainda existem desafios para a ampliação do uso de fertilizantes orgânicos em larga escala. Entre eles destacam-se a logística, devido ao elevado volume necessário por unidade de nutriente em comparação aos fertilizantes minerais, a padronização de garantias mínimas de nutrientes e a necessidade de capacitação técnica para formulações e aplicação adequadas aos diferentes cultivos.

2.3 Fatores que Influenciam a Eficiência Agronômica na Fertilização Orgânica

A eficiência agronômica de fertilizantes pode ser compreendida como a produção econômica obtida por unidade de nutriente aplicado. Para alcançar um máximo de rendimento nos cultivos agrícolas é necessário compreender bem os fatores que podem influenciar na fertilização orgânica. Ao se tratar de hortaliças, administrar esses aspectos é de grande importância para o êxito da produção (FAGERIA, 1998).

Informações sobre dinâmica dos nutrientes no sistema solo – planta – atmosfera são cruciais para discutir os fatores ambientais sobre a eficiência da fertilização orgânica, pois são fenômenos que interferem de forma significativa na disponibilidade destes nutrientes para as plantas. Sobre a nutrição mineral de plantas, o princípio básico diz que os vegetais necessitam de 14 nutrientes essenciais minerais para o seu pleno crescimento e desenvolvimento, que são divididos em macronutrientes e micronutrientes (DECHEN et al., 2018).

As duas categorias de nutrientes em condições de limitação ou excesso afetam o ciclo vegetativo. Os macronutrientes geralmente requerem mais atenção porque apresentam frequente limitação na absorção pelas plantas e são exigidos em maiores quantidades pelas plantas. Neste sentido, o ciclo do N apresenta um conjunto diverso de transformações que envolve a ocorrência deste elemento no solo, no ar e na água e que são realizadas pelos microrganismos (LI et al., 2020).

O N está presente em uma série de moléculas orgânicas complexas como, nucleotídeos, aminoácidos e proteínas, que desempenham papéis indispensáveis no metabolismo das plantas (LI et al., 2013; FAGERIA et al., 1998), o que torna a adubação nitrogenada um dos insumos mais importantes para a produção de hortaliças (ZONTA, 2021). Especificamente, para sistema de produção de hortaliças, o K também representa grande limitação em função da grande demanda deste nutriente para o metabolismo desses vegetais (MATA, 2012).

Em vista disso, se o manejo da fertilização orgânica de base nitrogenada não for bem empregado quanto à dose e forma de aplicação, os fertilizantes podem ter sua eficiência reduzida devido às perdas por volatilização, nitrificação, desnitrificação, lixiviação e erosão. Isto leva ao aumento do custo de produção e contribui para danos ambientais como a contaminações de cursos d'água e a emissão de gases de efeito estufa e poluentes (HENTZ et al., 2014).

Quanto aos fatores ambientais, a temperatura e umidade atuam sobre a velocidade de decomposição e mineralização das fontes orgânicas no solo, que interfere na disponibilidade de nutrientes para as plantas. Umidade e temperaturas mais elevadas aceleram a decomposição da matéria orgânica, resultando em uma liberação mais rápida de nutrientes para as plantas (BRADY e WEIL, 2009). Em vista disso, a quantidade e a distribuição de chuvas influenciam a lixiviação de nutrientes e as perdas de N para a atmosfera (volatilização de amônia e emissão de óxido nitroso), o que afeta a resposta das adubações.

Notadamente, as taxas de liberação do N, P e K proveniente dos fertilizantes orgânicos dependem da decomposição e mineralização da matéria orgânica, que são mediados pela fauna e microrganismos do solo. Uma boa gestão da fertilização segue o princípio básico que as taxas de liberação desses nutrientes devem ser compatíveis com a demanda de nutrientes dos cultivos, recurso fundamental para propiciar maiores produtividades, consequentemente melhor eficiência agrônômica.

Filgueira (2017) ressalta que as hortaliças necessitam de um aporte significativo de nutrientes através das adubações. Por outro lado, como são culturas anuais, há mais chances da liberação mais lenta de nutrientes - comparado com a liberação mais rápida de nutrientes pelo uso de fertilizantes sintéticos - coincidir com a demanda completa do ciclo das hortaliças (ZONTA, 2021). Assim, também se evita o parcelamento das adubações.

Os solos brasileiros frequentemente apresentam baixa fertilidade natural e os nutrientes disponíveis geralmente não são suficientes para atender a elevada exigência nutricional das hortaliças, razão limitante para atender os padrões desejáveis de comercialização. Ademais, os nutrientes absorvidos pelas plantas não retornam ao solo após a colheita das culturas, o que leva a necessidade constante de adubações nos cultivos (BRADY e WEIL, 2009).

Os tipos de solo interferem na eficiência agrônômica da fertilização orgânica, uma vez que solos arenosos são mais suscetíveis aos processos de lixiviação e erosão dos nutrientes, apresentam baixa CTC (capacidade de troca catiônica), o que afeta a adsorção dos cátions nos colóides do solo, o que significa menor retenção e fornecimentos de nutrientes para as raízes das plantas (FIOREZE et al., 2012). Em alguns casos, a depender da condição química do solo, doses mais altas de fertilizantes podem ser necessárias, bem como parceladas.

Por outro lado, a fertilização orgânica é estratégica em solos arenosos, pois sua aplicação não está restrita somente para nutrição de plantas, já que aumenta a capacidade produtiva do solo a longo prazo, melhorando suas condições físicas, químicas e biológicas. Isso é possível em função dos benefícios do aporte de matéria orgânica através da fertilização (ABRANCHES et al., 2021).

Já solos com textura argilosa possuem maiores conteúdos de matéria orgânica e média/alta CTC, e os íons provenientes da mineralização das fontes orgânicas tendem a se fixar nos colóides, permitindo a biodisponibilidade de nutrientes as plantas. De acordo com Fioreze et al. (2012), a classe textural do solo afeta a nitrificação do N no solo após a adição de adubos

orgânicos, sendo que o solo com textura argilosa condicionou a redução deste processo em todos os adubos orgânicos adicionados (cama de aviário, esterco bovino), com menor potencial de nitrato no solo, e consequentemente menor chance de ocorrer a lixiviação e a desnitrificação.

Em vista disso, o manejo agrícola é essencial para otimizar a eficiência da fertilização orgânica devidos as perdas existentes naturalmente. Assim, é altamente relevante para o setor agrícola a busca por mecanismos ou métodos que atuem sobre estes fatores e consequentemente minimizem estas perdas (SOUZA et al., 2014).

Ainda sobre o fator manejo agrícola, a calagem consiste na prática de aplicar cal ou calcário no solo com a finalidade de neutralizar o alumínio e corrigir o pH para 5,5 a 6,5, bem como fornecer cálcio e magnésio. Essa prática visa melhorar a disponibilidade de nutrientes aplicados, o que aumenta a eficiência da fertilização orgânica. Além disso, estudos mostram que a combinação da calagem com a adubação orgânica pode aumentar a disponibilidade de fósforo no solo, melhorando a absorção pelas plantas (SOUZA et al., 2006).

A gestão do solo visando eficiência da adubação também inclui técnicas de preparo do solo, como a incorporação correta dos fertilizantes orgânicos com altos teores de nutrientes (principalmente o N), a fim de garantir uma distribuição uniforme e uma melhor disponibilidade de nutrientes para as raízes das plantas. Quando os adubos orgânicos são incorporados no solo, eles são fragmentados e distribuídos em partículas menores. Isso aumenta a superfície de contato entre a fonte orgânica e os microrganismos presentes no solo, o que acelera a decomposição (SOUZA et al., 2018).

Por exemplo, o estudo de Rocha et al. (2019) denota a importância do manejo agrícola sobre a eficiência dos fertilizantes com altos teores de N, pois constatou que a incorporação da torta de mamona reduziu a volatilização de amônia em torno de 78%, contribuindo para o melhor aproveitamento de N. O estudo de Wester-Larsen et al. (2022) também confirma a redução da volatilização, atestando a melhor eficiência de fertilizantes orgânicos a partir da incorporação no solo.

Além das práticas relatadas, práticas de conservação do solo, como cobertura morta e a rotação e consórcio de culturas, promovem adição regular de matéria orgânica, sendo o recurso chave para incrementar a CTC e a atividade biológica, colaborando progressivamente com a eficiência dos fertilizantes cujos atributos são aspectos químicos e biológicos importantes na construção da fertilidade do solo (SOUZA et al., 2018).

No que se refere às fontes orgânicas, a composição química dos fertilizantes orgânicos, principalmente, o teor de carbono e nitrogênio, determina a taxa de liberação de nutrientes, sua disponibilidade para as plantas e sua capacidade de suprir as demandas nutricionais. Por exemplo, fertilizantes orgânicos com relação C/N mais altas podem levar a uma imobilização temporária de N no solo, resultando em uma disponibilidade reduzida para as plantas (LEAL et al., 2018).

As diferentes fontes orgânicas utilizadas na fertilização orgânica, como esterco, compostos, resíduos vegetais e biofertilizantes, possuem composições químicas distintas e taxas de liberação de nutrientes variáveis. Em geral produtos de origem animal frescos sofrem um processo de mineralização mais acelerado do que produtos de origem vegetal, quando submetidos às mesmas condições de temperatura ambiente e umidade no solo (LEAL et al., 2018).

Desse modo, para o adubo orgânico ser eficiente para fertilização de hortaliças, as fontes orgânicas devem apresentar teores mínimos de N para evitar a imobilização, possuir liberação em velocidade compatível à demanda da cultura, e apresentar susceptibilidade à decomposição (relação C/N baixa). Esses fatores influenciam bastante na fertilização orgânica, ainda mais na produção de olerícolas que apresentam ciclo rápido e elevadas exigências nutricionais.

Apesar da descrição isolada dos fatores que influenciam a fertilização, efeitos positivos para a nutrição de plantas dependem de conjuntos de fatores climáticos, das características do

solo, das propriedades químicas das fontes orgânicas e do manejo, que interferem na mineralização da matéria orgânica. Esses fatores atuam de forma interligada no solo e na atmosfera e influenciam diretamente com a eficiência agronômica dos fertilizantes orgânicos. Então nenhum fator isolado aumentará a eficiência, pois as combinações integradas se apresentam como potencial considerável para o êxito da fertilização orgânica na produção de hortaliças.

2.4 Utilização de Leguminosa Arbórea *Gliricidia sepium* para Adubação Verde

A utilização de vegetais para adubação verde oferece benefícios para os sistemas agrícolas, especialmente pela formação de coberturas vegetais na superfície do solo. Essa abordagem enriquece a fertilidade do solo, favorece a ciclagem de nutrientes e contribui para a proteção contra a erosão. As plantas selecionadas para esse propósito pertencem a diferentes famílias botânicas e podem ter ciclos de vida anuais, semiperenes ou perenes (ABRANCHES et al., 2021; AMBROSANO et al., 2005; CORDEIRO et al., 2018). Entre as famílias de plantas utilizadas na adubação verde, a Fabaceae se sobressai pela habilidade de estabelecer parcerias simbióticas com bactérias que fixam o N₂ do ar, principalmente dos gêneros *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, o que possibilita fornecer quantidades significativas de N após o cultivo dessas leguminosas no solo (ESPINDOLA et al., 1997).

Levando em conta essa abordagem para a oferta de N nas unidades de produção, o desenvolvimento de pesquisas é essencial para melhorar a administração dos adubos verdes. A meta é descobrir e implementar espécies vegetais eficazes na geração de biomassa e na liberação de nutrientes, com o intuito de otimizar a fertilização em cultivos orgânicos. Essas espécies podem ser incorporadas por meio da rotação e do consórcio de plantas, além do cultivo direcionado para a produção de biomassa voltada à adubação.

Nesse cenário, Gonçalves Junior (2017) enfatizou a relevância da inclusão de árvores como a gliricídia em práticas de cultivo orgânico. A biomassa criada a partir de cortes planejados dessas espécies desempenha um papel importante na reposição de nutrientes, promovendo a sustentabilidade do sistema agrícola.

A gliricídia (*Gliricidia sepium*) é uma leguminosa arbórea, nativa do México e América Central. É uma árvore de pequeno a médio porte e que pode alcançar até 15 m de altura. É considerada uma planta resistente à seca, sendo muito utilizada como forragem em função de sua alta capacidade de fixar nitrogênio atmosférico e de produzir biomassa vegetal em condições restritas de água (De PAULA et al., 2015; GONÇALVES JÚNIOR, 2017). Quando usada como adubo verde, essa planta é capaz de melhorar a fertilidade do solo e de aumentar a produtividade das culturas agrícolas associadas.

O cultivo da gliricidia exige área com terreno plano ou ter uma declividade reduzida para facilitar a mecanização e evitar inundações. Embora a gliricídia desenvolva-se bem em solos de baixa fertilidade, a fertilidade é importante para a produção de biomassa. Portanto, sugere-se um solo que possua um teor disponível de potássio superior a 90 mg kg⁻¹, pois solo com escassez de potássio pode exigir a reposição deste elemento, elevando o custo de produção de biomassa (ARAÚJO et al., 2024).

O plantio pode ser realizado por estacas ou sementes. Porém, o plantio de mudas aumenta a variabilidade genética da espécie, o que repercute na melhor adaptação do sistema radicular pivotante no solo e permite maior resistência às estações secas. A inoculação de semente de gliricídia com *Rhizobium leguminosarum* (BR 8801) confere mudas mais altas comparadas às sem inoculação (ARAÚJO et al., 2024). Sendo que o transplantio das mudas pode ser realizado manualmente com auxílio de matraca e de forma mecanizada com plantadeira de mudas (ARAÚJO et al., 2024).

A época adequada do corte da gliricidia visando boas repostas de produção de biomassa se concentra em torno de 188 dias após o corte de nivelamento. Ressalta-se que o primeiro corte deve ser realizado um ano após o plantio de mudas (SANTOS et al., 2017). Nessa idade de corte, a produtividade de biomassa se estabiliza e as maiores quantidades de N são acumuladas na parte aérea da planta. Após esse período, ocorre o aumento da produção de caule e a queda da produtividade de folhas (SILVA, 2017).

É indicado que o corte da planta durante a colheita seja realizado entre 0,30 m e 1,5 m a partir de superfície do solo, pois não impacta na produtividade de biomassa aérea (GONÇALVES JÚNIOR, 2017). A colheita manual é feita com instrumentos como facão e motosserra. Já a coleta de biomassa mecanizada pode ser realizada com colhedora de forragem acoplada ao trator (ARAÚJO et al., 2024).

2.5 Histórico de Pesquisa sobre o Fertilizante a Base Biomassa de Gliricidia (N-Verde)

O cultivo de hortaliças responde por mais de 80% da produção de alimentos orgânicos (CANDIOTTO, 2018) e os fertilizantes permitidos pela legislação orgânica e mais comercializados no Brasil são a adubação verde, torta de mamona, bokashi e esterco de animais, porém apresentam restrição, devido à baixa eficiência agrônômica e custo elevado (ROCHA et al., 2019). Este último fator afeta diretamente o mercado e a rentabilidade da produção orgânica de hortaliças, por se tratar de um sistema de produção caracterizado pela necessidade de adubação nitrogenada (BRANCO et al., 2018). Portanto, uma das alternativas para manutenção da expansão da agricultura orgânica no país e a intensificação dos seus rendimentos é através de estratégias que aumentem a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados, bem como promovam o uso racional e sustentável desse recurso.

Tendo em vista esse cenário, um estudo promissor desenvolvido por Almeida (2007) buscou verificar a eficiência de um fertilizante a partir do corte, desidratação e moagem de biomassa aérea de diferentes espécies de leguminosas. A motivação do estudo consistiu nas poucas opções de fontes de N para sistemas orgânicos de produção. Os adubos verdes avaliados como fertilizantes foram a mucuna cinza (*Mucuna pruriens*), crotalária (*Crotalaria juncea*), arachis (*Arachis pintoii*), gliricídia (*Gliricidia sepium*) e leucena (*Leucaena leucocephala*). Dentre as espécies testadas, o fertilizante de gliricídia foi mais eficiente do que a cama-de-aviário na provisão de N no cultivo de alface juntamente com as demais leguminosas (Almeida, 2007). A gliricídia e a leucena forneceram maior volume e produção de material vegetal. A moagem das folhas permitiu maior interface de contato fertilizante-solo (ALMEIDA et al., 2008).

Em detrimento disso, Almeida et al. (2007) observaram que a leucena e a gliricídia, por serem espécies arbóreas, continham vantagens interessantes quanto maior produção anual de biomassa, capacidade de rebrota e ciclo perene. Desse modo, Almeida (2013) concentrou as avaliações sobre a gliricídia e leucena, e foi observado que adubações com este fertilizante de gliricídia processado por moagem foi capaz de prover N às culturas de forma comparável à ureia em termos de produtividade de capim citronela em casa de vegetação, contudo, em doses maiores do fertilizante orgânico nitrogenado. Além disso, foi evidenciado que a produtividade média dos bancos de gliricídia ($20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca) foi superior à dos bancos de leucena ($9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Apesar do uso promissor de fertilizante de leguminosas, o processamento em forma de farelo ou pó tem limitações quanto ao manuseio, transporte e armazenamento em decorrência de sua granulometria. A partir disso, Santos (2017) buscou ampliar o conhecimento disponível relacionado ao uso de fertilizantes orgânicos elaborados a partir da biomassa de gliricídia com vista ao desenvolvimento de protótipos granulados, com vantagens quanto ao manuseio, transporte, comercialização e eficiência agrônômica.

A biomassa em grânulos foi eficiente quanto ao desempenho agrônômico, com produtividade equiparável com a torta de mamona. Porém, apresentou restrição, com baixo rendimento de grânulos, não sendo compatível com a demanda esperada por um fertilizante (SANTOS, 2017). Além disso, a pesquisa forneceu importantes informações a respeito da eficiência deste fertilizante no cultivo da alface, denotando respostas de até 13% de recuperação de N derivado do N-verde, através da avaliação isotópica de ^{15}N . Ainda sobre esse estudo, foi possível identificar a época de corte da gliricidia com maior fornecimento de biomassa e teor de N. Assim, a produtividade de biomassa estabiliza próximo aos 188 dias após a poda de nivelamento, apresentando valor equivalente a $19,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de matéria seca total, com maiores quantidades de N acumulado na parte aérea.

No que refere ao manejo da gliricidia como adubo verde e utilização da biomassa da parte aérea através de podas programadas, o estudo de Gonçalves Júnior (2017) demonstrou que o manejo correto da poda da gliricidia proporcionou quantidades elevadas de biomassa e de N acumulados na parte aérea e favoreceu uma boa produção de material vegetal para aporte de nutrientes. O autor também destacou que esse material contribuiu com o aumento das produtividades de hortaliças e não é afetada pela altura do corte. Logo, a altura pode ser ajustada facilmente pelo manejo de corte. A altura a 0,30 m a partir da superfície do solo é mais estratégica com maior aproveitamento da biomassa aérea e compatível com implementos de agrícolas.

Estudos recentes de Rezende (2023) e Mello (2024) foram desenvolvidos para aumentar a eficiência da biomassa de gliricidia, bem como obter aproveitamento total da biomassa (folhas e caules). Por sua vez, Rezende (2023) buscou avaliar o efeito na disponibilização de N da inoculação com leveduras, por ocasião da incubação da biomassa moída de ramos e folhas de *Gliricidia sepium*. Os resultados não foram satisfatórios como esperado, pois não possibilitaram aumento de produtividade e eficiência de recuperação de N.

Mello (2024) utilizou a compostagem para aumentar a disponibilidade de N e aproveitar caule da gliricidia para produção do N-verde. Porém, devido a altos níveis de N perdidos por volatilização de amônia, a técnica não foi considerada viável do ponto de vista ambiental, com perdas próximas a 39% nos primeiros 45 dias de compostagem.

Recentemente, Araújo et al. (2024) aperfeiçoaram a técnica de colheita da gliricidia, com uso da colhedora de forragem adaptada à altura e época de corte. A mecanização foi capaz de reduzir o tempo de colheita e o custo de manejo, além de favorecer a rebrota. O comunicado técnico ainda inclui recomendações técnicas sobre a produção de mudas com sementes inoculadas com uma bactéria fixadora de nitrogênio específico para gliricidia, preparo do solo, adubação e correção do solo para garantir alta produtividade e longevidade do banco de biomassa.

De forma geral, esses resultados de pesquisas apontam o uso promissor do fertilizante à base de biomassa de gliricidia para o incremento de N em cultivos orgânicos de hortaliças. No entanto, ainda há questões em aberto relacionadas a otimização da gestão da biomassa, aproveitamento total da biomassa aérea, acessibilidade, impacto econômico e ambiental após a aplicação no solo.

3. CAPÍTULO I

**ARRANJO ESPACIAL DA *GLIRICIDIA SEPIUM* AUMENTA A
PRODUÇÃO DE BIOMASSA RICA EM NITROGÊNIO EM SOLO
FRÁGIL NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL**

3.1 RESUMO

A *Gliricidia sepium* é uma leguminosa arbórea de elevada importância agroecológica, destacando-se como adubo verde pela alta produção de biomassa, rápida liberação de nitrogênio e facilidade de manejo. Contudo, há escassez de informações sobre o arranjo espacial mais eficiente para maximizar sua produtividade em ambientes de baixa fertilidade natural. Este estudo teve como objetivo definir o arranjo de plantio que otimize a produção de biomassa aérea e o acúmulo de nitrogênio da *Gliricidia sepium* cultivada em solo arenoso e distrófico do sudeste do Brasil. O experimento foi conduzido em delineamento fatorial (3×2) com três espaçamentos entre plantas (0,3; 0,5 e 1,0 m) e dois tipos de fileiras (simples e dupla). O espaçamento de 0,3 m entre plantas resultou no maior rendimento de biomassa seca total, atingindo 25 Mg ha⁻¹, e na maior acumulação de N na parte aérea, com 832 kg ha⁻¹ no segundo ano. O tipo de fileira não afetou a proporção de folhas e caules, mas o arranjo de fileiras duplas promoveu acréscimo de 38% na biomassa nitrogenada em relação às fileiras simples. Em comparação ao espaçamento de 1,0 m, o adensamento de 0,3 m em fileiras duplas aumentou em 51% a acumulação de N na biomassa. Esses resultados evidenciam que o plantio adensado de *Gliricidia sepium* é uma estratégia agronomicamente eficiente para intensificar a oferta de biomassa rica em nitrogênio, mesmo em solos frágeis, ampliando o potencial dessa espécie como insumo renovável para a produção de fertilizantes orgânicos e adubação verde em sistemas agrícolas sustentáveis.

Palavras-Chave: Árvore. Leguminosa. Densidade de plantio.

3.2 ABSTRACT

Gliricidia sepium is a leguminous tree of high agroecological importance, notable as green manure due to its high biomass production, rapid nitrogen release, and ease of management. However, there is a lack of information on the most efficient spatial arrangement to maximize its productivity in environments with low natural fertility. This study aimed to define the planting arrangement that optimizes the production of above-ground biomass and nitrogen accumulation of *Gliricidia sepium* grown in sandy and dystrophic soil in southeastern Brazil. The experiment was conducted in a factorial design (3×2) with three plant spacings (0.3, 0.5, and 1.0 m) and two types of rows (single and double). The 0.3 m spacing between plants resulted in the highest total dry biomass yield, reaching 25 Mg ha⁻¹, and the highest N accumulation in the aerial part, with 832 kg ha⁻¹ in the second year. The row type did not affect the proportion of leaves and stems, but the double row arrangement promoted a 38% increase in nitrogenous biomass compared to single rows. Compared to the 1.0 m spacing, the 0.3 m densification in double rows increased N accumulation in biomass by 51%. These results show that dense planting of *Gliricidia sepium* is an agronomically efficient strategy to intensify the supply of nitrogen-rich biomass, even in fragile soils, expanding the potential of this species as a renewable input for the production of organic fertilizers and green manure in sustainable agricultural systems.

Keywords: Tree. Legume. Planting density.

3.3 INTRODUÇÃO

Plantas de cobertura ou adubos verdes são espécies vegetais cultivadas com o propósito de proteger o solo, reduzir perdas por erosão, reciclar nutrientes e, conseqüentemente, aumentar a produtividade de cultivos subsequentes (SILVA et al., 2024). Para o bom desempenho agrônômico, é desejável que os adubos verdes apresentem sistema radicular vigoroso, elevada produção de biomassa e rápido crescimento, características que favorecem a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

As espécies mais utilizadas como adubos verdes pertencem principalmente às famílias Fabaceae e Poaceae, embora também sejam encontradas representantes das famílias Asteraceae e Brassicaceae. As leguminosas (Fabaceae) destacam-se por sua capacidade de estabelecer associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico, como *Rhizobium* e *Bradyrhizobium* (MUELLER e THORUP-KRISTENSEN, 2001; SANT'ANNA et al., 2018). Por meio dessa simbiose, quantidades expressivas de nitrogênio (N) são fixadas biologicamente e incorporadas ao sistema produtivo, tornando-se disponíveis após a decomposição da biomassa vegetal (CORDEIRO et al., 2018; GOULART et al., 2021).

A elevada capacidade das leguminosas de fixar N₂ atmosférico e transferi-lo ao solo faz da adubação verde uma estratégia fundamental em sistemas de produção orgânica e de baixo insumo (DA SILVA et al., 2024; SILVA et al., 2024). Dentre essas espécies, destaca-se *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp., uma leguminosa arbórea de múltiplos usos, caracterizada por elevada produção de matéria seca, ciclo perene e capacidade de sombreamento. Seu cultivo é comum em sistemas integrados, em aleias, como cerca viva ou tutor vivo (ALAMU et al., 2023; ARAÚJO et al., 2024).

A biomassa de *Gliricidia sepium* possui dupla aptidão: pode ser utilizada tanto para alimentação animal (forragem e silagem) quanto para adubação do solo, seja na forma de adubação verde ou cobertura morta. Estudos conduzidos no Sudeste do Brasil demonstraram que o uso da leguminosa como cobertura morta, proveniente de podas programadas, foi capaz de aumentar o rendimento de hortaliças folhosas, além de reduzir a emergência de plantas espontâneas e favorecer a diversidade da fauna edáfica (GONÇALVES JÚNIOR, 2017).

Em comparação com outras leguminosas, como crotalária, mucuna e leucena, as folhas de gliricídia apresentam liberação mais rápida de nitrogênio, resultado de seus baixos teores de lignina e polifenóis (BAH & RAHMAN, 2001; PAULA et al., 2015). Essa decomposição acelerada proporciona maior disponibilidade de nutrientes às culturas subsequentes, tanto quando aplicada como cobertura quanto quando incorporada ao solo (ALMEIDA et al., 2008; GONÇALVES JÚNIOR, 2017; MDAH et al., 2024). A biomassa dessa espécie é também matéria-prima valiosa para compostagem e produção de fertilizantes orgânicos e organominerais, como o N-verde, formulado a partir da peletização de folhas moídas de gliricídia (SANTOS, 2017; REZENDE, 2023; SILVA et al., 2024).

Embora *Gliricidia sepium* possa atingir até 15 m de altura quando não manejada, avanços recentes no manejo da espécie permitiram sua colheita mecanizada com o uso de colhedoras de forragem, otimizando o tempo de trabalho e reduzindo significativamente a demanda por mão de obra, uma hora/máquina equivale a mais de 80 horas/homem (ARAÚJO et al., 2024). No entanto, ainda são escassas as informações sobre o arranjo espacial ideal para maximizar a produção de biomassa por hectare. O espaçamento entre plantas e fileiras influencia diretamente o aproveitamento de luz, água e nutrientes, afetando o rendimento de biomassa e o teor de nitrogênio acumulado (ALAMU et al., 2023).

A adubação verde com *Gliricidia sepium* representa, portanto, uma alternativa promissora para a agricultura familiar, especialmente em áreas de baixa fertilidade natural e com restrita disponibilidade de insumos externos. Seu uso contribui para reduzir a dependência de fertilizantes minerais nitrogenados, ampliar a autonomia dos agricultores e diminuir os

custos de produção. Além disso, a utilização da biomassa de gliricídia na formulação de fertilizantes peletizados favorece a produção local de insumos de alta qualidade, promovendo sistemas agrícolas mais sustentáveis, resilientes e economicamente viáveis.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo definir o arranjo espacial de plantio mais eficiente para *Gliricidia sepium*, visando maximizar a produção de biomassa aérea por unidade de área e, conseqüentemente, o potencial de fornecimento de nitrogênio para sistemas agrícolas de baixo insumo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Localização, clima da área de estudo e análise de solo

O experimento foi instalado em abril de 2021, na área experimental da Embrapa Agrobiologia, denominada “Terraço”, em Seropédica, Rio de Janeiro (latitude 22°45'S, longitude 43°39'O; altitude de 33 m). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (clima tropical com estação seca), com precipitação média anual de cerca de 1400 mm, porém com maiores índices nos meses de dezembro a março. A temperatura média diária varia de 15 a 35 °C ao longo do ano. Os verões são quentes e úmidos e os invernos mais secos com temperaturas mais amenas.

O solo da área onde o estudo foi conduzido é classificado como uma transição de Argissolo Vermelho-Amarelo série Itaguaí para um Planossolo série Ecologia (RAMOS et al., 1973). São solos distróficos, com textura média a arenosa, cujas análises químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de C orgânico total (COT), pH, Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, P extraível (Mehlich 1) e K⁺ no solo da área experimental, na profundidade de 0-20 cm, que foi cultivada com as árvores de gliricidia, Seropédica, RJ.

COT	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P	K ⁺
g kg ⁻¹		cmolc kg ⁻¹			mg dm ⁻³	
0,7	5,8	0	1,88	0,6	26	14

A análise de COT foi feita por digestão úmida; pH em água (1:2,5 solo:água); Al, Ca e Mg, extração com KCl 1M, e análise por titulação (Al) e espectrometria de absorção atômica (Ca e Mg); K e P, extração Mehlich e análise por fotometria de chama e colorimetria, respectivamente (Embrapa, 2017).

3.4.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 3 x 2, com três repetições. Cada parcela experimental tinha 3 x 5 m, sendo utilizadas 18 parcelas no total. Foram avaliados três espaçamentos entre plantas (0,3 m, 0,5 m e 1,0 m), combinados com dois tipos de fileiras (simples e duplas). O espaçamento de 1,5 m entre linhas foi adotado para todos os tratamentos em fileiras simples, e de 1,0 m entre fileiras duplas (Figura 2).

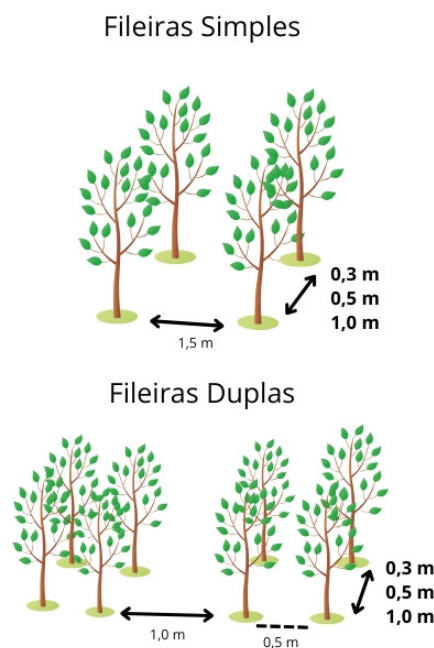


Figura 2. Representação gráfica da organização do arranjo das árvores espaçadas e em dois tipos de fileiras no campo experimental.

3.4.3 Instalação do experimento, tratos culturais e corte das plantas de gliricídia

Para a instalação das parcelas experimentais, foi feito o controle da vegetação espontânea dentro das parcelas e ao redor da área experimental, com o auxílio de roçadeiras costais motorizadas.

O preparo do solo foi realizado com uma aração e duas gradagens. Não foi feita calagem nem adubação de plantio e cobertura. Em 09/04/2021, foi feito o plantio das mudas de acordo com os espaçamentos pré-estabelecidos. As mudas de gliricídia foram preparadas em bandejas de isopor de 72 célula, as sementes foram semeadas em substrato comercial. As mudas foram transplantadas 90 dias após a semeadura das sementes.

As parcelas experimentais com fileiras simples foram constituídas de cinco linhas. Já as fileiras duplas foram formadas por três fileiras duplas. A área útil foi constituída de três plantas centrais, onde foram coletados os dados para análise estatística. As densidades de plantios para as fileiras simples, nos espaçamentos 0,3 m, 0,5 m e 1,0 m entre plantas, foram respectivamente, 22.222, 13.333 e 6.666 plantas ha^{-1} . Nas fileiras duplas, foram respectivamente 33.000, 20.000 e 10.000 plantas ha^{-1} .

O primeiro corte de nivelamento foi realizado em 09/12/2021 (plantas com 244 dias de idade) à altura de 0,3 m do solo. Foram realizadas três coletas durante o ano, sendo assim seis coletas compõem as avaliações realizadas em 2022 e 2023.

O intervalo aproximado entre as coletas de cada rebrota foram de quatro e cinco meses, seguindo o critério de corte quando as árvores alcançavam 1,5 m de altura. A exceção do primeiro corte, que apresentou intervalo maior (8 meses). Em todas as coletas foi mantida a mesma metodologia e avaliadas as mesmas variáveis descritas para a primeira.

Tabela 2. Cronologia das coletas e período de rebrota de árvores de gliricídia, realizadas em 2022 e 2023.

Corte inicial	Coleta da rebrota					
	1°	2°	3°	4°	5°	6°
Dezembro/2021	Mar/2022	Set/2022	Dez/2022	Abr/2023	Set/2023	Dez/2023

Antes de cada coleta, avaliou-se o diâmetro da base caulinar, com o auxílio de um paquímetro, bem como a altura de cada planta utilizando a fita métrica. Em seguida, realizou-se o corte e pesagem das plantas, com auxílio de motosserra e balança de campo (Figura 3). A altura do corte foi feita a 0,3 m a partir da superfície do solo, conforme recomendado por Gonçalves Júnior (2017). O material colhido da área útil foi pesado com balança de campo (Figura 3). Em seguida, foram retiradas subamostras do material fresco deste material vegetal, separados o caule e folhas dessas amostras para quantificar a proporção destas partes da planta.



Figura 3. Detalhe da aérea experimental, medição e pesagem da planta de gliricidia. Seropédica - RJ. Fonte: Acervo fotográfico da Autora.

As subamostras foram acondicionadas em sacos de papel e levadas à balança analítica para mensuração da massa fresca, e em seguida levadas para secar em estufa de circulação de ar forçada, a 65 °C durante 72 h, até obter-se massa seca constante. Determinou-se o teor de umidade do material vegetal. Após esta etapa, as amostras foram trituradas em moinho Wiley, e analisadas para o teor de N pelo método Kjeldahl.

3.4.4 Análises estatísticas

Antes de prosseguir com ANOVA, foi realizada a análise dos resíduos quanto a normalidade, e a homogeneidade de variâncias por meio de testes Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente.

Havendo diferença significativa pelo teste F da ANOVA, as médias dos tratamentos foram separadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Foi utilizado o software R para a realização das análises fatoriais, considerando a interação dos fatores espaçamento e fileira. As análises estatísticas foram realizadas separadamente para cada coleta da gliricidia (Tabela 2). As variáveis respostas avaliadas foram altura (m), diâmetro (mm), produção de biomassa seca total da parte aérea ($Mg\ ha^{-1}$), porcentagem de caules e folhas (%) e quantidade de N acumulado na biomassa aérea ($kg\ ha^{-1}$).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ano de 2022, não foi verificada interação dos fatores espaçamento e de fileiras para as variáveis analisadas em nenhuma das três coletas realizadas. O diâmetro das plantas não foi afetado pelos espaçamentos avaliados, mas houve diferença na acumulação de biomassa seca e altura.

Em todas as coletas, a biomassa seca refletiu efeito dos tratamentos, sendo o espaçamento 0,3 m o que proporcionou melhor desempenho (Figura 4). Por outro lado, a altura das plantas foi maior no maior espaçamento (1,0 m), embora o efeito tenha sido observado apenas no segundo corte e, com menor acúmulo de N na biomassa em todas as coletas.

No estudo de Rondon (2006) os espaçamentos mais densos possibilitaram maior fornecimento de biomassa, e a altura não foi influenciada pela densidade de plantas. Não obstante, Vera et al. (2022) em estudo sobre densidade de plantio com eucaliptos, constatou maior altura das plantas em espaçamento maiores, o que é explicado por, geralmente, permitir menor competição entre as plantas, uma vez que ocorre maior acesso à luz solar e nutrientes. Isso favorece maior crescimento vertical das árvores.

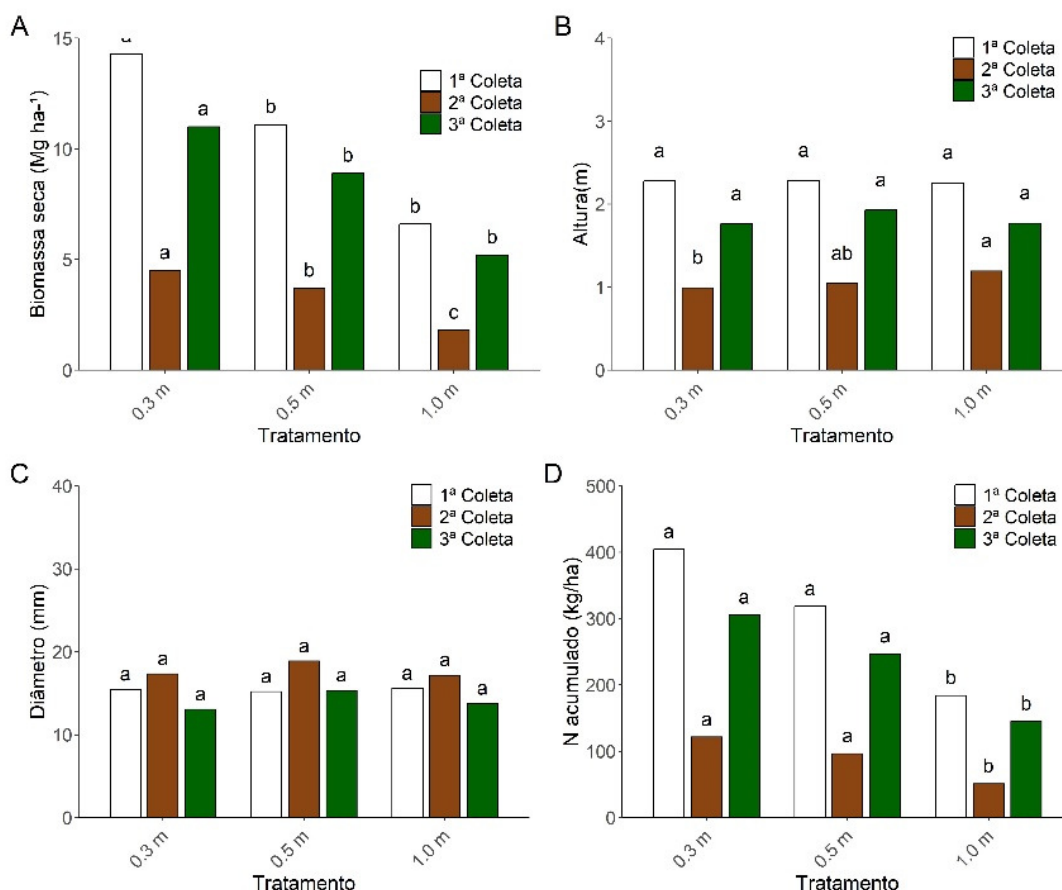


Figura 4. Desempenho da glicídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do espaçamento entre plantas no primeiro ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2022). As comparações foram feitas dentro de cada coleta e médias seguidas de letras diferentes indicam efeito do espaçamento entre plantas, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

O tipo de fileira (simples ou dupla) teve pouco efeito sobre o desempenho das plantas (Figura 5). Apenas na segunda coleta, as fileiras duplas apresentaram maior biomassa e N acumulado comparado às fileiras simples ($p < 0,05$). A altura e o diâmetro das plantas não foram modificados pelo tipo de fileira.

A tendência de redução de crescimento da gliricídia na 2ª coleta, ou corte, se explica pelo período de rebrota e crescimento coincidir com o período outono-inverno. Essa época do ano é caracterizada por menor frequência e baixos volumes de chuvas, e pela ocorrência de temperaturas mais baixas. Essas condições limitam o pleno desenvolvimento das espécies de plantas da família leguminosa, o que já vem sendo destacado em estudos anteriores (ALAMU et al., 2023; KARIM e SAVILL, 1991; MBAH et al., 2024; PAULA et al., 2015).

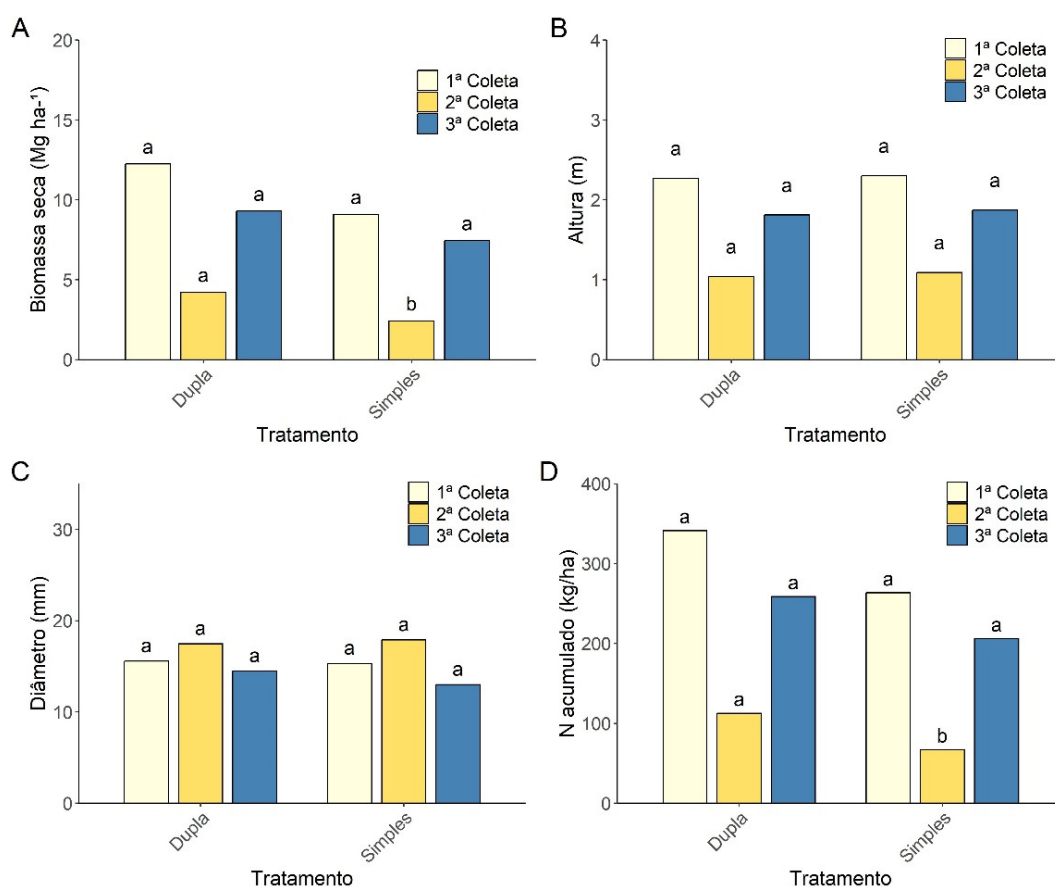


Figura 5. Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do arranjo de fileiras no primeiro ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2022). As comparações foram feitas dentro de cada coleta, e médias com letras diferentes indicam efeito do tipo de fileira, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Elaborado pela Autora.

No segundo ano de avaliação (2023), também não foram observadas interações entre fatores, independente da coleta. O aumento da biomassa foi diretamente relacionado com a redução do espaçamento, sendo o espaçamento de 0,3 m o que resultou em maiores acúmulos de biomassa seca de gliricídia, nas três coletas (Figura 6). Esses resultados confirmam o desempenho observado no primeiro ano, o que é também reforçado por outros relatos de experimentos, em que os menores espaçamentos favoreceram melhores rendimentos, tal como observado nas culturas da moringa (EDDIE, 2014), *Tectona grandis* (RONDON, 2006) e tomate (SALLES, 2018). Sendo assim, é possível que o aumento no crescimento de plantas resultante da redução do espaçamento tem um determinado limite, além do qual o desenvolvimento pode ser prejudicado (LATT et al., 2000).

O efeito sazonal também se observa no segundo ano, com menor desenvolvimento de plantas no período outono-inverno (entre a 1ª e 2ª coleta), e, de forma mais consistente, não houve efeito do espaçamento na altura das plantas e diâmetro do caule (Figura 6).

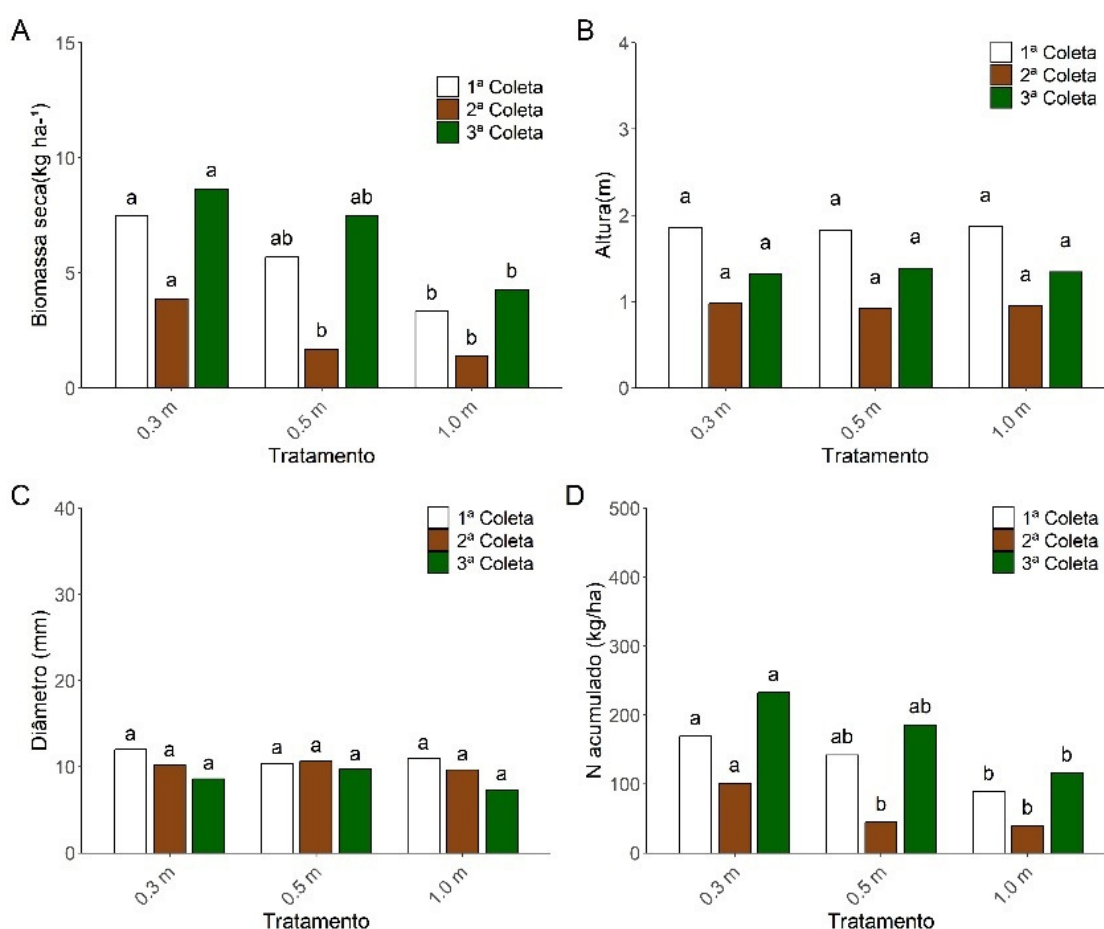


Figura 6. Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do espaçamento entre plantas no segundo ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2023). As comparações foram feitas dentro de cada coleta e médias seguidas de letras diferentes indicam efeito do espaçamento entre plantas, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

No que refere ao tipo de fileira, a gliricídia em fileiras duplas apresentou maior rendimento de biomassa, bem como acumulação de N em duas das três coletas (Figura 7), e o diâmetro do caule das plantas foi menor em fileiras simples na segunda coleta.

Apesar dos fatores espaçamento e fileira não apresentarem interação significativa para as variáveis analisadas, o rendimento de biomassa em espaçamentos de 0,3 m entre plantas foi 22% superior nas fileiras duplas em comparação às fileiras simples. Associado a isso, no estudo de Eddie (2014) sobre arranjo espacial com cultura da moringa, foi evidenciado que maiores populações de plantas em área com espaçamentos menores favorecem maiores acumulações de biomassa seca e com diâmetros menores. Por outro lado, baixas populações de plantas parecem causar o espessamento do caule. De acordo com esse estudo, plantas em baixas densidades de plantio possuem maior disponibilidade de recursos para um crescimento adequado (umidade e nutrientes), e assim as raízes não precisam se expandir em busca desses recursos. Por conseguinte, o aumento da densidade populacional de plantas, restringe a disponibilidade de água e nutrientes, e pode atuar no estímulo do crescimento e expansão das raízes na busca desses recursos, acelerando o crescimento com maior produção de biomassa da parte aérea num curto intervalo de tempo (EDDIE, 2014). Porém, é um fenômeno que depende largamente da fertilidade do solo.

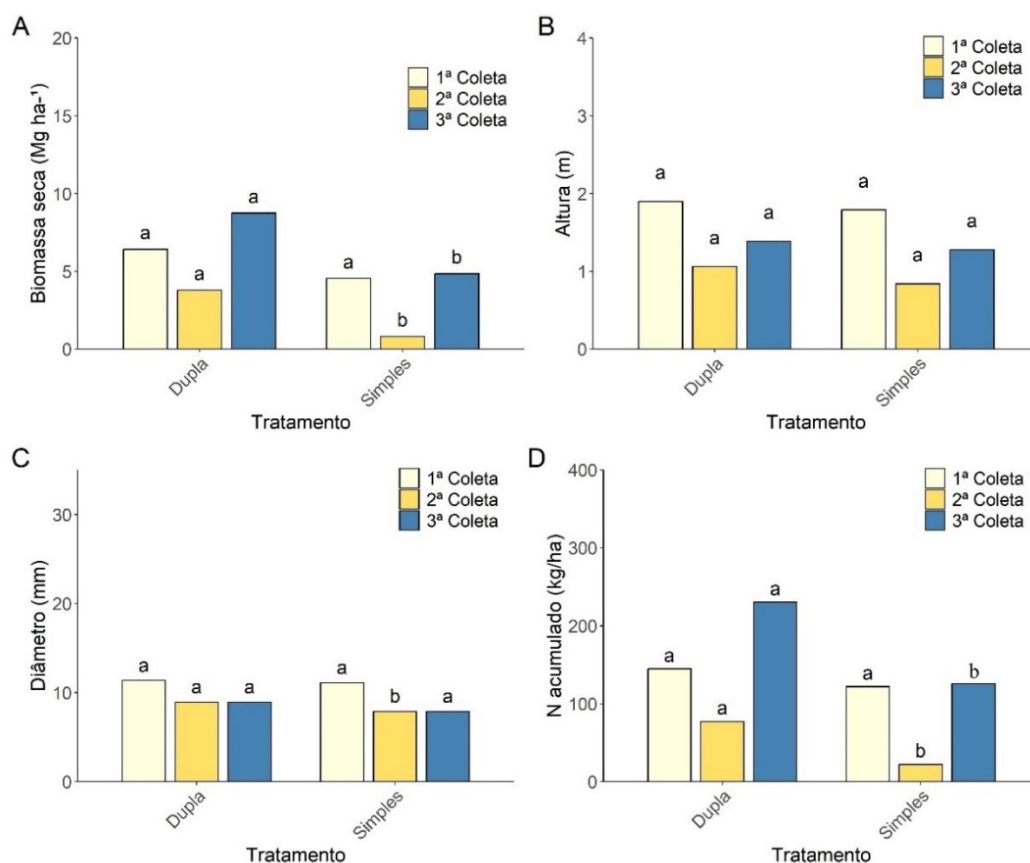


Figura 7. Desempenho da gliricídia quanto a acumulação de biomassa (A), altura (B) e diâmetro do caule (C), N acumulado da biomassa aérea (D) em função do arranjo de fileiras no segundo ano de avaliação (Seropédica, RJ, 2023). As comparações foram feitas dentro de cada coleta, e médias com letras diferentes indicam efeito do tipo de fileira, segundo o teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

Na 2ª coleta, no segundo ano de monitoramento, houve efeito interativo significativo entre fileira e espaçamento ($p < 0,05$). Nesta coleta, o maior acúmulo de N foi maior nas plantas espaçadas a 0,3 m dispostas em fileiras duplas, com potencial máximo de acumulação das três coletas de 832 kg N ha⁻¹ (Figura 8). Resultados semelhantes sobre acúmulo de N também foram

observados por Gonçalves Júnior (2017), o que reforça a importância do manejo da poda da gliricídia sobre a produtividade e como fonte de N quando usada para adubação verde.

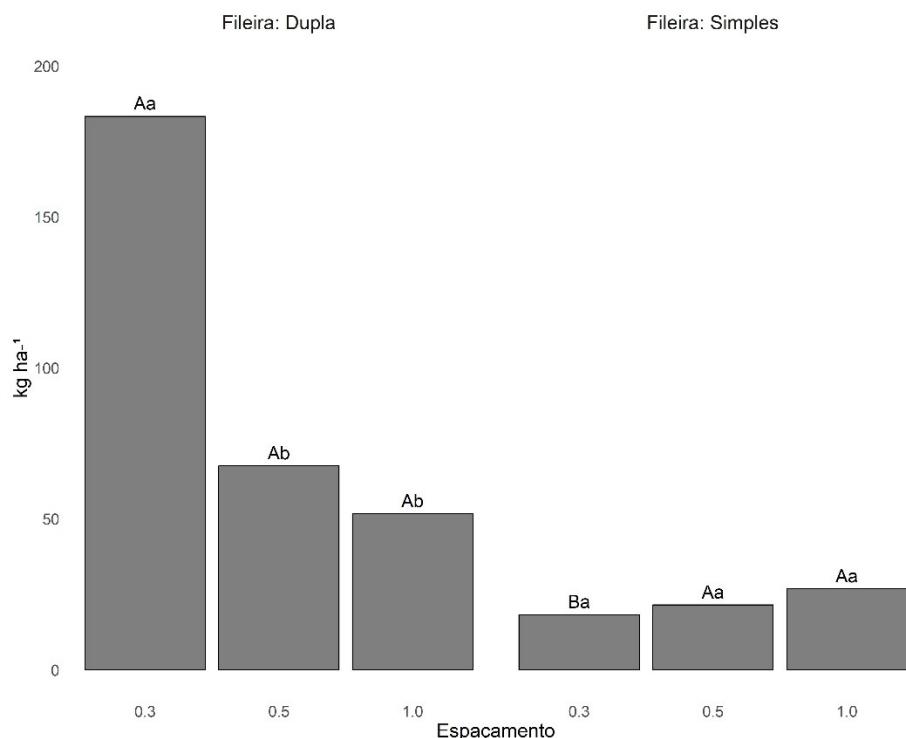


Figura 8. Quantidade de nitrogênio acumulado (kg ha^{-1}) na biomassa aérea da gliricídia na segunda coleta de 2023. Médias representadas por letras maiúsculas indicam o efeito das fileiras dentro de cada nível de espaçamento, enquanto letras minúsculas indicam o efeito do espaçamento dentro do nível de cada fileira, conforme o teste de Tukey, com 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

A capacidade da gliricídia de se reproduzir vigorosamente após ser cortada é de grande importância para as etapas de produção do fertilizante N-verde. O potencial de rebrota desta leguminosa já foi reportado por Edvan et al. (2016), Gonçalves Júnior (2017) e Santos (2017), que encontraram grandes quantidades de biomassa e de N acumulados na parte aérea, estimuladas pelas podas. Cabe destacar que a utilização desta espécie arbórea pode ser direcionada para a produção do N-verde, ou mesmo usada no próprio local de cultivo para aproveitar a biomassa como adubo.

Neste estudo, houve uma queda de 25% na produtividade de biomassa no ano agrícola de 2023, o que parece estar relacionado com a redução dos níveis de potássio no solo (Tabela 1). Essa leguminosa é caracterizada pela grande demanda de potássio, e o manejo com contínua remoção de biomassa precisa ser acompanhado da reposição de nutrientes no solo. Neste sentido, Araújo et al. (2024) recomendam que para alcançar boas produções de biomassa, é importante que o solo não apresente baixos níveis de potássio, condição observada no solo da área experimental (Tabela 1). Além disso, solos de textura arenosa, como é o caso do solo da área experimental, são mais suscetíveis aos processos de lixiviação e erosão dos nutrientes, fato associado à baixa CTC (capacidade de troca catiônica), implicando em menor retenção de potássio (FIOREZE et al., 2012).

Uma meta considerada adequada para de produção de biomassa vegetal seca é de $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}$. Neste estudo, mesmo em condições restritas de fertilidade do solo, foi atingida. O que mostra a vantagem dessa espécie arbórea quanto à rusticidade.

Neste trabalho, o espaçamento de 0,3 m entre plantas apresentou produção de 25 e 20 Mg ha⁻¹, considerando a soma das três coletas realizadas ao longo dos anos. Esse espaçamento permitiu maior acúmulo de biomassa de gliricídia, com adequada proporção de folhas e caules finos, características ideais para o uso como adubo verde (SANTOS, 2017). Comparado ao espaçamento 0,5 m, a utilização de 0,3 m proporcionou um aumento no rendimento de biomassa de 20% em 2022 e 28% em 2023. Quando comparado ao espaçamento de 1,0 m, esse ganho com o uso de 0,3 m foi ainda maior, alcançando 54% e 78%, respectivamente.

A proporção entre folhas e caule é bem próxima de 50%, como uma tendência geral (Figura 9). Em mesmas condições de solo e clima, os estudos de Santos (2017) e Almeida (2012) com a gliricídia mostraram que, aproximadamente 113 dias após a poda, a proporção de caule e folha foi semelhante ao obtido no presente estudo. Um leve aumento da proporção de caule foi notado no primeiro ano, quando as plantas estavam em um arranjo em fileiras duplas (Figura 9). Isto ocorreu, em geral, na 2ª coleta, quando as plantas crescem menos devido ao período mais seco de outono-inverno na região. Isso pode estar associado a uma competição entre as plantas pela água do solo, maior na fileira dupla. Em ambientes com limitação hídrica, as espécies arbóreas tendem a reduzir as perdas de água por meio da redução da área foliar (PICOTTE et al., 2009), o que implica na mudança da relação caule/folha, e em especial com o aumento da densidade de árvores (STEKEL et al., 2020). Esta é uma informação relevante, pois ambientes menos restritivos quanto a estresse hídrico se tornam mais aptos para a produção do N-verde, condição em que a massa de folhas pode ser maximizada comparada à de caule (Figura 9).

De forma geral, o espaçamento 0,3 m possibilita uma proporção de 50% folhas e 50% de caule, e a utilização de fileiras duplas tem maior potencial para maximizar a acumulação de massa e de N, embora havendo o inconveniente de maior produção de caule em relação a folhas na ocorrência de períodos mais longos de restrição hídrica. Um estudo econômico, para avaliar custos e o rendimento do processo de produção do adubo é necessário para uma análise mais assertiva sobre o N-verde como produto comercial.

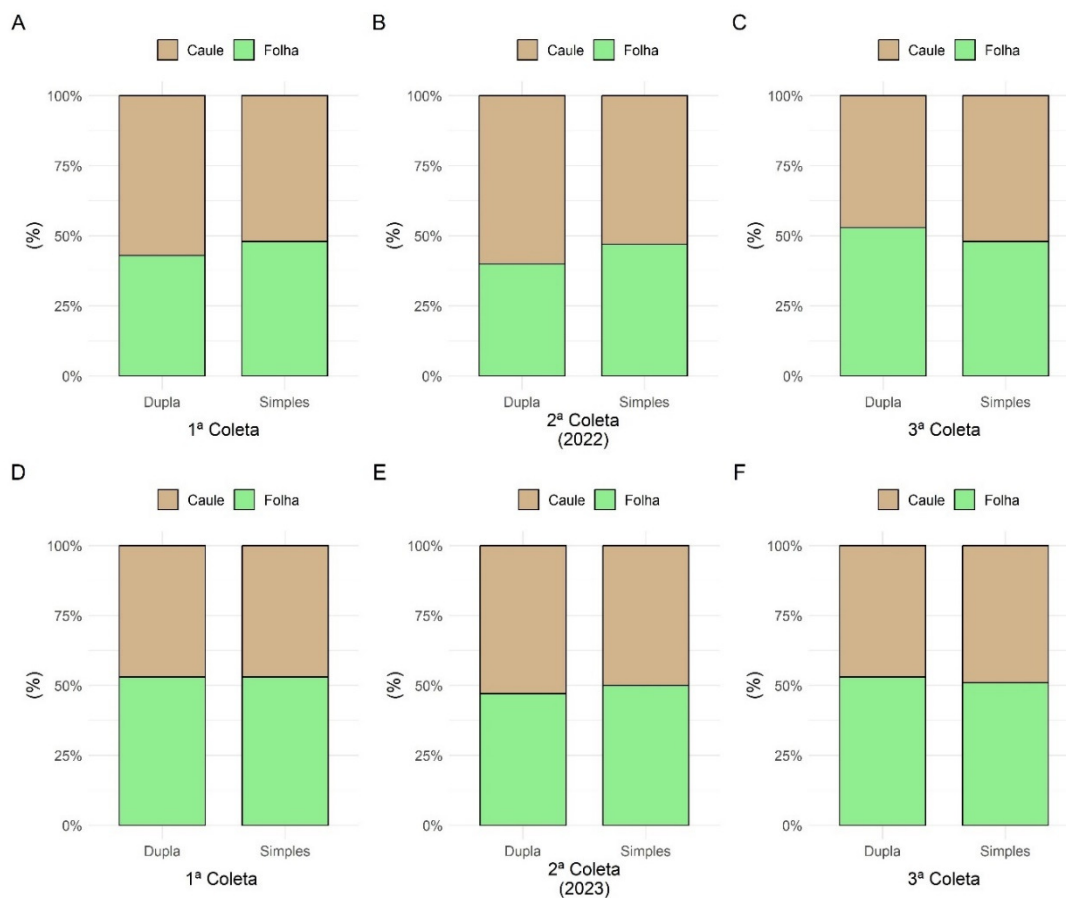


Figura 9. Proporções de caule (%) e folha (%) da gliricidia mensuradas no espaçamento 0,3 m em fileiras simples e dupla em 2022(A, B e C) e 2023 (C, D e F). Ausência de letras indica que não houve diferença estatística pelo teste F ($p>0,05$). Fonte: Elaborado pela Autora.

É importante ressaltar que o arranjo de plantas seja compatibilizado com a mecanização do sistema, importantes para um manejo mais eficiente de colheita da gliricidia, e considerando-se o custo com mudas.

3.6 CONCLUSÕES

A *Gliricidia sepium* com espaçamento de 0,3 m entre plantas em fileiras duplas mostrou-se o arranjo mais eficiente para maximizar a produção de biomassa e o acúmulo de nitrogênio em solo de baixa fertilidade natural. Esse manejo atingindo até 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, e incrementos expressivos na quantidade de nitrogênio acumulado, mesmo em condições edáficas restritivas. Esses resultados demonstram que o manejo adensado de *Gliricidia sepium* constitui uma estratégia agronomicamente eficiente e sustentável para intensificar a oferta local de biomassa rica em nitrogênio, especialmente em sistemas agroecológicos e orgânicos estabelecidos em solos frágeis. A adoção desse modelo de plantio pode contribuir para reduzir a dependência de fertilizantes químicos, ampliar a autonomia dos agricultores familiares e fortalecer cadeias produtivas baseadas em insumos biológicos.

4 CAPÍTULO II

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTE A BASE DE BIOMASSA DE GLIRICIDIA NA PRODUÇÃO ORGÂNICA DE ALFACE

4.1 RESUMO

A escassez de fontes de nitrogênio (N) eficientes, acessíveis e permitidas pela legislação representa um desafio mundial para a agricultura orgânica, o que dificulta a competitividade dos sistemas orgânicos de produção. Nesse contexto, o fertilizante obtido a partir do processamento das folhas de *Gliricidia sepium* em pellets, conhecido como N-verde, é uma alternativa promissora para ampliar o acesso ao N. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência agrônômica do N-verde em dois ciclos consecutivos de alface, conduzidos nos anos de 2022 e 2023. Os tratamentos consistiram em doses de 0, 50, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹ de N para o estudo de doses, além da comparação com cama de aviário e torta de mamona nas doses de 100 e 300 kg ha⁻¹ de N. A adubação foi aplicada apenas no primeiro ciclo de cada ano, permitindo a avaliação do efeito residual no segundo ciclo. A dose de máxima resposta foi de 250 kg ha⁻¹ de N, com eficiência agrônômica de 93 kg de alface fresca por kg de N aplicado na forma de N-verde. A produção comercial, a eficiência agrônômica e a recuperação aparente de N foram iguais e/ou superiores às das fontes convencionais. A produtividade de alface foi menor no segundo ano para todas as fontes de N. Através da análise de modelos mistos foi verificado que o N-verde apresentou maior estabilidade no fornecimento de N, com desempenho mais consistente que o observado para a torta de mamona frente aos fatores ambientais. A adubação residual não sustentou o mesmo rendimento do primeiro ciclo, mas proporcionou níveis de produção com padrões comerciais. Os resultados destacam o N-verde como uma fonte renovável, eficiente e padronizada de N com potencial para fortalecer e aumentar o rendimento dos sistemas orgânicos de produção.

Palavras chaves: Adubação verde. Leguminosa. Olerícolas.

4.2 ABSTRACT

The scarcity of efficient, affordable, and legally permitted nitrogen (N) sources represents a global challenge for organic agriculture, hindering the competitiveness of organic production systems. In this context, the fertilizer obtained from processing *Gliricidia sepium* leaves into pellets, known as N-verde, is a promising alternative to increase access to N. This study aimed to evaluate the agronomic efficiency of N-verde in two consecutive lettuce cropping cycles conducted in 2022 and 2023. Treatments consisted of N doses of 0, 50, 100, 200, 300, and 400 kg ha⁻¹ for the dose-response study, as well as comparisons with poultry litter and castor cake at rates of 100 and 300 kg ha⁻¹ of N. Fertilization was applied only in the first cycle of each year, allowing the assessment of residual effects in the second cycle. The maximum response dose was 250 kg ha⁻¹ of N, with an agronomic efficiency of 93 kg of fresh lettuce per kg of N applied as N-verde. Commercial yield, agronomic efficiency, and apparent N recovery were equal to or higher than those of conventional sources. Lettuce yield was lower in the second year for all N sources; however, mixed model analysis showed that N-verde had greater stability in N supply, with more consistent performance than castor cake under varying environmental conditions. Residual fertilization did not sustain the same yields as the first cycle but provided production levels meeting commercial standards. The results highlight N-verde as a renewable, efficient, and standardized N source with potential to strengthen and increase yields in organic production systems.

Keywords: Green manure. Legume. Vegetable crops.

4.3 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira é caracterizada pela dependência de importação para aquisição de fertilizantes, ocupando 8% do consumo global desses insumos (FARIA et al., 2020). A maior parte dos fertilizantes utilizados no país é de origem não renovável, e embora tragam benefícios, como o aumento da produtividade, seu uso pode levar a impactos ambientais significativos (BERGSTRAND, 2022; FARIA et al., 2020).

Essa dependência externa influencia diretamente o custo de produção e a estabilidade dos preços para o agricultor brasileiro, tornando a cadeia produtiva mais vulnerável às oscilações do mercado internacional. Diante desse cenário, há incentivo do governo nacional por fontes alternativas de nutrientes que sejam sustentáveis. Nesse contexto, fertilizantes derivados de matérias-primas renováveis apresentam-se como alternativas promissoras para diferentes sistemas agrícolas. Isso é especialmente relevante para agricultura orgânica e agroecológica que carecem de fontes mais eficientes, pois o uso de fertilizantes sintéticos é restrito (CANDIOTTO, 2018; CARDARELLI et al., 2023).

As fontes de nitrogênio (N) mais utilizadas em sistemas orgânicos de produção são de origem orgânica e, por sua natureza heterogênea e baixo teor de N, em comparação aos fertilizantes solúveis, tem eficiência agrônômica influenciada pelos fatores ambientais (AGUIAR et al., 2024; CORDEIRO et al., 2024; MUSYOKA et al., 2017; PIAN et al., 2023). Uma opção natural e de baixo custo é a fixação biológica de nitrogênio (FBN), promovida por microrganismos diazotróficos em simbiose com leguminosas. Esse processo biológico é bem documentado em culturas como a soja (Alves et al., 2003), mas também pode ser explorado por meio da adubação verde com espécies leguminosas menos conhecidas comercialmente, porém eficientes na FBN, como *Gliricidia sepium* (ARAÚJO et al., 2011; MUELLER AND THORUP-KRISTENSEN, 2001; SANT'ANNA et al., 2018).

Apesar de seu potencial, a adubação verde enfrenta barreiras práticas para adoção pelos produtores, como a necessidade de áreas específicas para seu cultivo para plantas de cobertura, além da dificuldade de sincronizar a liberação do N da biomassa com a demanda nutricional das culturas subsequentes em sistemas de rotação (GOULART et al., 2021; VIEIRA FILHO et al., 2023). Para superar essa limitação, foi desenvolvido um produto inovador a partir da peletização da biomassa aérea da *gliricídia*, resultando no fertilizante orgânico N-verde.

A escolha da *gliricídia* para o uso nessa tecnologia deve-se ao fato de ser uma leguminosa arbustiva perene, rustica, que pode ser cultivada por longos períodos, com elevada produção anual de biomassa rica em N. Além disso, seu cultivo exige poucos tratos culturais, o que a torna uma fonte interessante e viável de matéria-prima para a produção de fertilizantes (ALAMU et al., 2023; ARAUJO et al., 2024; KARIM e SAVILL, 1991).

A peletização da biomassa torna a biomassa mais acessível, facilita o manuseio, aumentando o tempo de armazenamento e permitindo a padronização do insumo. Isso resulta em um produto com maior densidade, compatível com aplicação mecanizada e com melhor logística de transporte e comercialização (SILVA et al., 2024).

A tecnologia apresenta potencial para aumentar a oferta de fontes N para sistemas orgânicos de produção, bem como para amenizar a complexidade na produção sustentável de sistemas agroecológicos e convencionais, especialmente em contextos que exigem independência de insumos externos e práticas regenerativas para o solo, cujos princípios se encaixam em 5 dos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (FAO, 2017).

Embora o N-verde surja como mais uma opção para mercado de fertilizantes orgânicos, sua eficiência ainda não está totalmente estabelecida, o que dificulta a formulação de recomendações práticas para os agricultores. Portanto, é fundamental avaliar o seu desempenho comparativamente às fontes tradicionais de N permitidas pelas legislações da agricultura orgânica. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho agrônômico do fertilizante

N-verde na produção orgânica de alface, ao longo de dois ciclos consecutivos, e compará-lo com duas fontes orgânicas amplamente utilizadas: a torta de mamona e a cama de aviário compostada.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização, clima da área de estudo e análise de solo

O experimento foi instalado na Fazendinha Agroecológica Km 47, um Sistema Integrado de Produção Agroecológica, pertencente a três instituições públicas, Embrapa Agrobiologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio de Janeiro. A Fazendinha Agroecológica Km 47 está situada no município de Seropédica (RJ), localizado entre os paralelos 22° 49' e 22° 45' S e os meridianos 43° 23' e 43° 42' O, em altitude média de 33 m, na Baixada Fluminense. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (Clima tropical com estação seca).

O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (SANTOS et al., 2018) e, apresentava a seguinte constituição química na camada de 0-20 cm: pH em H₂O: 6,4; Al: 0 cmolc dm⁻³; Ca⁺Mg: 4,3 cmolc dm⁻³; P: 126 mg dm⁻³; K: 180 mg dm⁻³ e COT: 11 g kg⁻¹ conforme metodologia apresentada em (EMBRAPA, 2017).

O histórico da área experimental nos últimos 20 anos consistiu no uso de adubos verdes, como crotalária, feijão de porco e mucuna como pré-cultivo. Culturas comerciais cultivadas foram feijão, aipim e hortaliças folhosas. A adubação com fertilizantes orgânicos consistiu no uso de esterco, torta de mamona e resíduos culturais de leguminosas. O preparo do solo foi com aração e gradagem e encanteiramento.

Nos períodos de avaliação referente aos ciclos de cultivo da alface, a temperatura média do ar foi de 21,3 °C e 23,4 °C, mínimas de 15,6 °C e 26,5 °C e máximas 16,9 °C e 31,1 °C para anos de 2022 e 2023, respectivamente. A precipitação acumulada durante o período estudo foi de 62 mm e 50 mm, a precipitação acumulada em 15 dias após a aplicação dos tratamentos foi de 8,4 e 45 mm, respectivos a 2022 e 2023 (Figura 10).

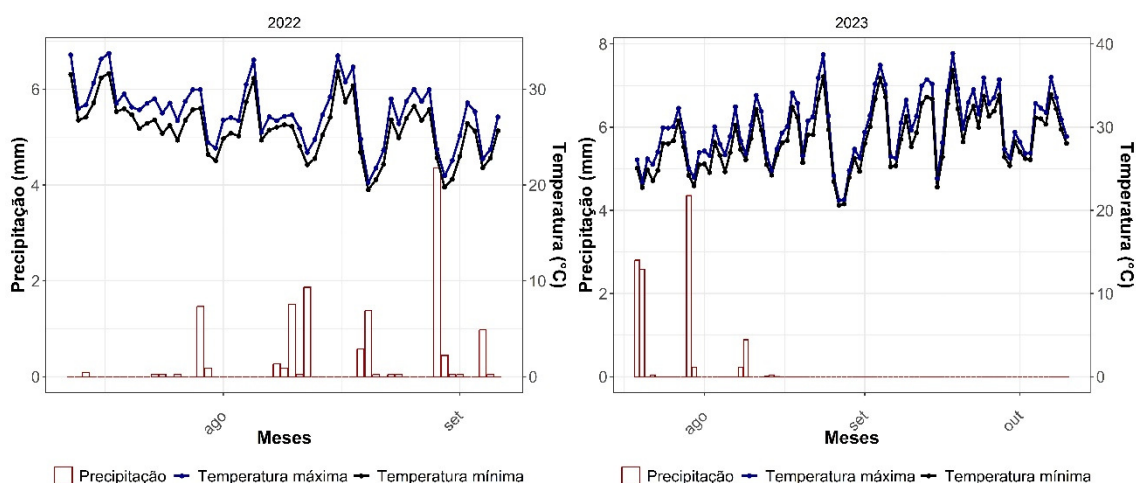


Figura 10. Dados climáticos do estudo de campo nos anos: 2022(A) e 2023 (B). Os dados da precipitação e, temperaturas máximas e mínimas do ar foram obtidas da estação climática automática Ecologia do INMET. Seropédica, RJ, Brasil. Fonte: Elaborado pela Autora.

4.4.2 Descrição dos tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos utilizados foram três tipos de fertilizantes orgânicos: cama de aviário compostada, torta de mamona e fertilizante de folhas de gliricídia (N-verde). Estas fontes orgânicas foram submetidas a diferentes doses de N no cultivo orgânico de alface.

Esses tratamentos compuseram o experimento delineado em blocos ao casualizados para medir o desempenho da cultura da alface em resposta a crescentes doses de N (0, 50, 100,

200, 300 e 400 kg N ha⁻¹) como N-verde. Um segundo experimento, conduzido paralelamente ao anterior, foi realizado no mesmo período e na mesma área experimental. O delineamento foi em blocos casualizados, compreendendo um fatorial 3 x 2, sendo um fator três fonte de N (cama de aviário, torta de mamona e N-verde) e o outro fator duas doses de N (100 e 300 kg N ha⁻¹). Para os dois experimentos, foram utilizadas cinco repetições.

As 50 parcelas experimentais que compunham os dois experimentos foram estabelecidas em uma área de canteiro anualmente utilizada para produção orgânica. Cada parcela apresentava uma área de 2 m² (1 m x 2 m).

Os fertilizantes utilizados neste estudo apresentaram os seguintes teores de N: fertilizante peletizado oriundo de folhas de gliricídia (N-verde) com 4% de N; torta de mamona comum farelada com 6,8% de N; e cama de aviário compostada com 2 % de N.

O N-Verde foi obtido a partir de biomassa de parte aérea processada de gliricídia cultivada na Fazendinha Agroecológica Km 47. Foram utilizadas apenas as folhas da gliricídia, sendo fragmentadas em picadeira acoplada a trator. Em seguida, todo o material foi disposto sobre lona plástica para secagem ao sol. Após a secagem, a biomassa foi finamente moída e, então, encaminhada ao laboratório de desenvolvimento de ativos para agroecologia (LDAA) onde foi transformada em pellets.

A cama-de-aviário, constituída de uma mistura de maravalha e dejetos de frangos, foi compostada antes de sua utilização. Foi obtida a partir de um produtor orgânico, tendo sido oriunda de unidade familiar de base agroecológica da Região Serrana do Estado do RJ, Brasil. A torta de mamona foi adquirida em lojas comerciais diretamente da indústria.

Na produção das mudas de alface, foram utilizadas sementes da cultivar Vera, que se caracteriza como uma cultivar do tipo crespa, com plantas volumosas de ciclo entre 60 e 65 dias, que não formam cabeças, indicada para plantio durante o ano todo.

4.4.3 Etapas na condução da produção da alface

No ano de 2022, entre maio e agosto, foi realizada a primeira etapa dos tratamentos, que consistiu na avaliação do primeiro ciclo da alface. As mudas de alface foram produzidas em bandejas de isopor de 128 células abastecidas com substrato constituído de húmus (83%), carvão (15%) e torta de mamona (2%). Foram posteriormente transplantadas para a parcela experimental, obedecendo-se um espaçamento de 0,25 x 0,25 m entre plantas, totalizando 32 plantas por parcela.

Os adubos orgânicos foram aplicados sete dias antes do plantio, na adubação de base. A irrigação foi realizada por aspersão, duas vezes ao dia, a depender das condições climáticas e necessidade das plantas. O controle das plantas espontâneas foi feito por meio de capinas manuais. Não houve necessidade de controle fitossanitário.

Para fins de colheita e avaliação, consideraram-se as quatro plantas centrais para quantificação da matéria fresca da parte aérea (g planta⁻¹). Uma planta de cada parcela foi destinada para avaliação da matéria seca e teor de N. As subamostras foram levadas para secagem em estufa de ventilação forçada a 65 °C por 72 h, trituradas em moinho Wiley e avaliadas para determinação do teor de N pelo método Kjeldahl (EMBRAPA, 2017).

Em julho de 2022, após a colheita do primeiro ciclo, o segundo plantio foi realizado no experimento, compreendendo um segundo ciclo de alface subsequente nas mesmas parcelas. Portanto, o segundo ciclo foi planejado para avaliar o efeito da adubação residual, ou seja, sem a aplicação de uma nova adubação. No ano seguinte, em maio de 2023, todas as etapas metodológicas experimento foram repetidas. Ressalta-se que todos os tratamentos, procedimentos metodológicos, e avaliações descritas acima para o primeiro ano foram repetidos na mesma área experimental.

Para os experimentos de 2022 e de 2023, os respectivos dados de matéria fresca, seca e teor de N foram utilizados para calcular a quantidade de N acumulada pelas plantas de alface. Os cálculos de eficiência seguiram os descritos nas equações abaixo (FAGERIA, 1998; FAGERIA e BALIGAR, 2005).

Eficiência agronômica:

$$\frac{\text{Produção em kg com adubação} - \text{Produção em kg sem adubação}}{\text{Quantidade de nutriente aplicada em kg}} \quad (1)$$

Eficiência de recuperação aparente:

$$\left(\frac{\text{Acumulação de nutriente com adubação em kg} - \text{Acumulação de nutriente sem adubação em kg}}{\text{Quantidade de nutriente aplicada em kg}} \right) \times 100 \quad (2)$$

4.4.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para comparar os efeitos do N-verde em relação às demais fontes de nitrogênio em cada ano agrícola. Quando a ANOVA indicou diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey, considerando um nível de significância de 5%. Para avaliar a resposta da alface às doses de N, foi realizada análise de regressão. As doses de N que proporcionaram a máxima produção de alface foram estimadas pela primeira derivada da equação quadrática ajustada aos dados de produção, igualada a zero. Os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett foram utilizados, respectivamente, para verificar a normalidade dos resíduos e a homogeneidade de variâncias nos modelos de regressão e na análise de variância.

Adicionalmente, o modelo linear misto foi adotado na comparação entre as fontes para verificar consistência de comportamento nos dois anos de avaliação, bem como estimar efeitos médios obtido nos dois anos. Os tratamentos e os anos foram considerados efeitos fixos, enquanto os blocos foram tratados como efeito aleatório. Assim, foi adotada uma estrutura de covariância composta simétrica (Compound Symmetry) para modelar a dependência entre os anos dentro da mesma unidade experimental. O modelo foi ajustado pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML), utilizando o pacote nlme no software R. As médias ajustadas (LSMEANS) foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se 5% de significância ($p < 0,05$). Todas as análises foram feitas no Software R (R CORE TEAM, 2017).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1 Resposta da cultura da alface a doses crescentes de N-verde

No primeiro ciclo de produção da alface, para os dois anos de experimentação, a acumulação de massa fresca da parte aérea foi diretamente relacionada com o aumento das doses de N na forma de N-verde, sendo os dados de produção ajustados ao modelo quadrático (Figura 11). Esse padrão de resposta tem sido observado em outros estudos, utilizando fontes orgânicas ou solúveis como a ureia (HONG et al., 2022; SYLVESTRE et al., 2019; ZANDVAKILI et al., 2022).

A resposta da alface à adubação com N é muito comum, mesmo sendo a cultura conduzida em canteiros que frequentemente recebem doses elevadas de esterco e outros insumos. Isso pode estar associado ao curto ciclo da cultura, cuja produção de raízes fica limitada a uma camada mais superficial do solo, explorando uma fração relativamente pequena do volume de solo fertilizado com N (SANTOS et al., 2013; THORUP-KRISTENSEN, 2001). Consequentemente, o excedente do N aplicado pode ser perdido para o ambiente, a exemplo da lixiviação de nitrato (SYLVESTRE et al., 2019).

As doses de N que permitiram máxima produção de alface no primeiro ciclo foram de 262 kg N ha⁻¹ no primeiro ano (Figura 12A), e de 249 kg N ha⁻¹ no segundo ano (Figura 12B). Para o primeiro ciclo do primeiro ano, a produção máxima de massa fresca por planta de alface foi de 245 g, enquanto para o segundo ano, foi de 241 g, números que equivalem a aproximadamente 39 t ha⁻¹.

Esse nível de produtividade foi próximo das 44 t ha⁻¹ de matéria fresca de alface crespa da cultivar Vanda, encontrada por Sylvestre et al. (2019) em um plantio convencional, no inverno, em Jaboticabal, SP, porém com uma dose de aproximadamente 120 kg N ha⁻¹ na forma de ureia. Como o N-verde é um pellet das folhas de gliricídia, a liberação do N para o solo não é imediata como ocorre com a ureia, e tampouco se espera que todo o N seja liberado ao longo do ciclo da alface. Por isso, em termos comparativos, esperam-se doses maiores de N de fontes orgânicas do que de fontes solúveis para uma mesma meta de produção.

De acordo com Zaharah and Bah (1999); Silva et al. (2023), os componentes orgânicos mais lábeis das folhas de gliricídia se decompõem em aproximadamente 25 a 30 dias, representando 40% da massa seca inicial, liberando aproximadamente 50% do total de N existente. O remanescente segue uma taxa de decomposição e liberação de N bem mais lenta, tendo contribuído muito pouco para o total liberado após 70 dias. Certamente, fatores ambientais e edáficos interferem significativamente na decomposição de resíduos vegetais, e, além disso, o comportamento do N-verde, preparado a partir folhas peletizadas, deve se diferenciar de fragmentos maiores de folhas da gliricídia normalmente usadas na adubação verde (WALPOLA e ARUNAKUMARA, 2011).

A dose de N-verde para se obter máxima produção diminuiu um pouco entre os anos avaliados (de 262 para 249 kg N ha⁻¹), o que pode estar relacionado a um efeito residual, ou a diferenças entre os dois anos nas taxas de mineralização do N-verde mediada pelas condições climáticas existentes. No entanto, para a região do estudo, a liberação de N da biomassa da gliricídia foi similar ao observado por (REZENDE, 2023). Nesta referida pesquisa, a autora utilizou biomassa de gliricídia processada em pellets ou em grânulos na fertilização de cebolinha e alface, respectivamente, em Seropédica, RJ. Ambos os trabalhos identificaram que as doses mais eficientes ficaram em uma faixa de 200 a 250 kg de N ha⁻¹.

Com base no presente estudo, a eficiência agrônômica da produção de alface pode ser calculada como a diferença entre a produção máxima deduzida da produção sem o uso de N, dividida pela dose que proporcionou a máxima produção (RAIJ et al., 1997). Neste caso, as quantidades produzidas foram obtidas da equação polinomial que representa a curva de resposta

da cultura da alface às doses de N-verde, somente para o primeiro ciclo da cultura, simulando o esperado em produção comercial.

Em vista disso, para o primeiro ano (Figura 11A), a dose para uma máxima produção de alface de 245 g planta⁻¹, ou 39,2 t ha⁻¹, foi de 262 kg N ha⁻¹, mas sem a fertilização com N-verde, a produção foi de 103 g planta⁻¹, ou 16,5 t ha⁻¹. Isso resultou em uma eficiência agronômica do N-verde de 86 kg alface fresca kg⁻¹ N aplicado. Para o segundo ano, a produção foi de 241 g planta⁻¹, ou 38,6 t ha⁻¹, com a dose de 249 kg N ha⁻¹, porém a produção reduziu para 87 g planta⁻¹ sem o uso de N, ou 13,9 t ha⁻¹. Ou seja, a eficiência agronômica do N-verde foi de 99 kg alface fresca kg⁻¹ de N. Em média, para os dois anos, a eficiência do N-verde foi de aproximadamente 93 kg de alface fresca kg⁻¹ N na forma de N-verde.

A eficiência agronômica é um índice que varia bastante em função das condições do tipo de fertilizante, tipo da cultura, solo e clima. No entanto, os números obtidos neste estudo são similares aos encontrados por (SYLVESTRE et al., 2019) estudando a mesma variedade de alface (Vanda). Esses autores utilizaram a ureia como fonte de N, e calcularam uma eficiência agronômica de aproximadamente 68 kg de alface fresca kg⁻¹ N, em ensaios conduzidos no verão e no inverno em Jaboticabal, SP. Esta mesma eficiência agronômica foi encontrada por (PEDRILHO et al., 2020) também utilizando a ureia como fonte de N porém em estudo com a variedade Vera, conduzido no sul do Brasil. Embora esses estudos indiquem que o presente trabalho tenha sido bem conduzido, o desempenho do N-verde como fonte de N é mais bem avaliado numa comparação simultânea com fontes tradicionais como esterco, ou fontes processadas, utilizadas em sistemas orgânicos de produção.

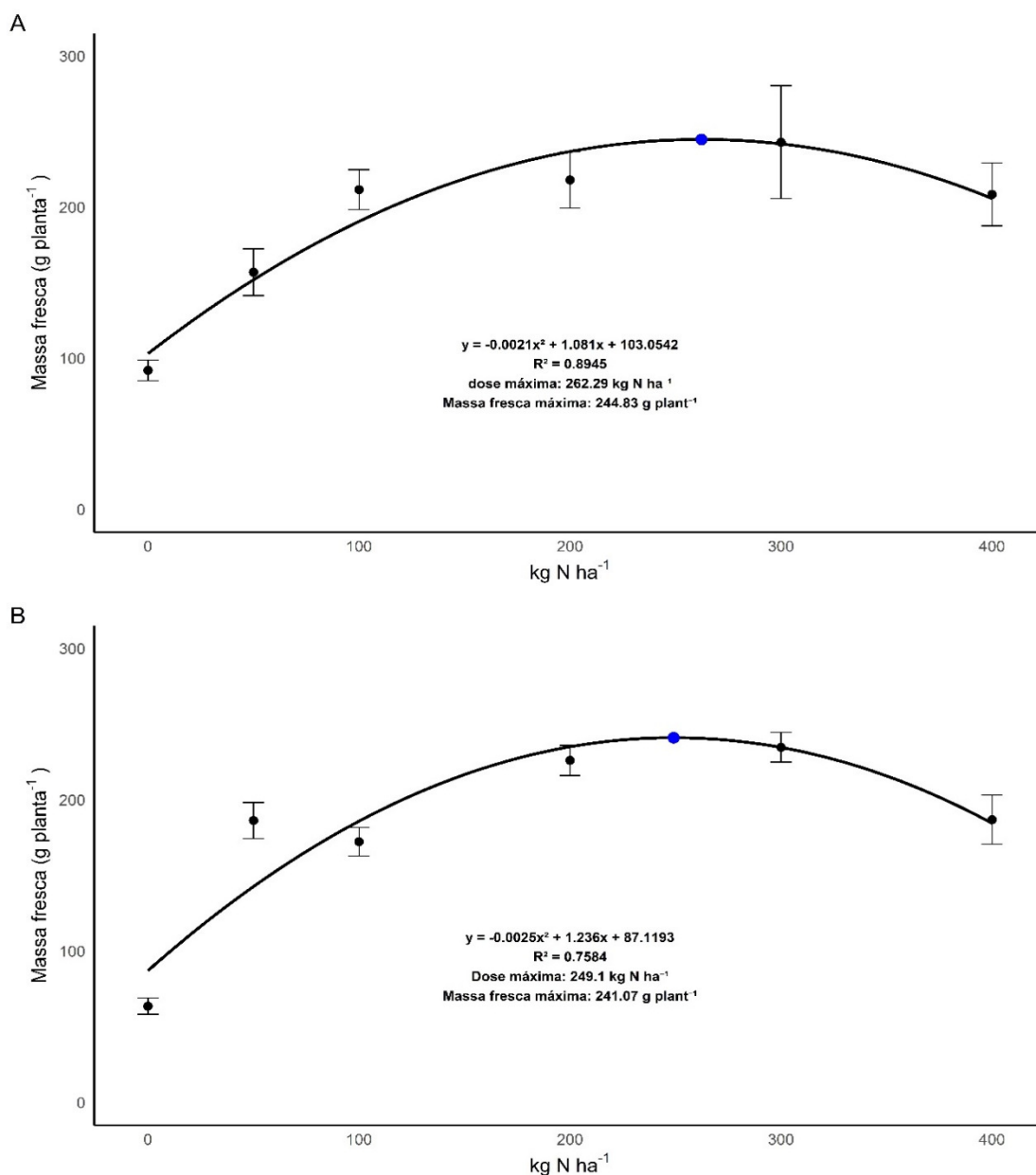


Figura 11. Massa fresca de plantas de alface (g planta⁻¹) submetidas a doses crescentes de N-verde em produção orgânica na adubação de plantio. A: 1º ciclo (2022) e B: 1º ciclo (2023). As barras nos pontos que representam as médias indicam o erro padrão. Fonte: Elaborado pela Autora.

4.5.2 Comparação de fertilizantes orgânicos na produção de alface

Para ter uma melhor avaliação do desempenho do N-verde no suprimento de N em sistemas orgânicos, foi feita uma comparação com a cama de aviário e com a torta de mamona, muito utilizadas por produtores comerciais. Não houve interação entre os fatores, dose e fertilizantes, para os parâmetros fitotécnicos avaliados pela análise de variância.

No primeiro ciclo da alface, no primeiro ano de avaliação, os fertilizantes resultaram em produção de massa fresca de alface estatisticamente similar tanto para 100 como 300 kg N ha⁻¹ (Figuras 13 e 14). Essa resposta foi a mesma quando se considerou a produção de matéria seca e a acumulação de N. Para a dose menor, a produção média de massa fresca foi de 230 g

planta⁻¹, que expresso em base seca foi equivalente a 30 g planta⁻¹, representando uma acumulação de 17 g N m⁻² (Figura 12). Considerando, a adubação residual, a acumulação de massa fresca, seca e a acumulação de N foram de, respectivamente, 148 g planta⁻¹, 9 g planta⁻¹, e 5 g N m⁻².

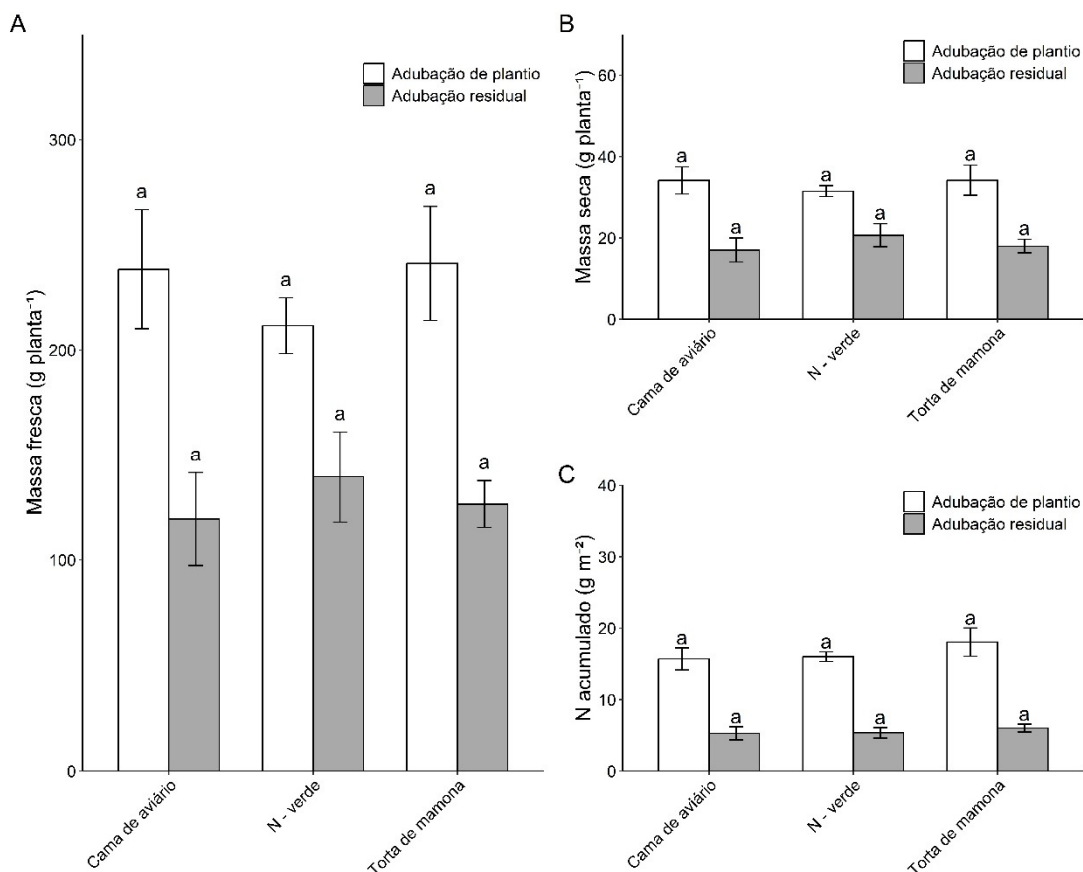


Figura 22. Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fontes de N na dose de 100 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2022. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento, diferem entre si pelo teste de Tukey no nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

Para a dose de 300 kg N ha⁻¹, não houve diferença entre as fontes de N quanto à produção de massa fresca, no primeiro ciclo ou mesmo na adubação residual, indicando um efeito residual semelhante entre as fontes. No entanto, a quantidade de N acumulada foi diferente, sendo maior com o uso do N-verde e a torta de mamona em comparação com a cama de aviário. Na adubação residual, as fontes de N apresentaram o mesmo desempenho para esses referidos parâmetros (Figura 13).

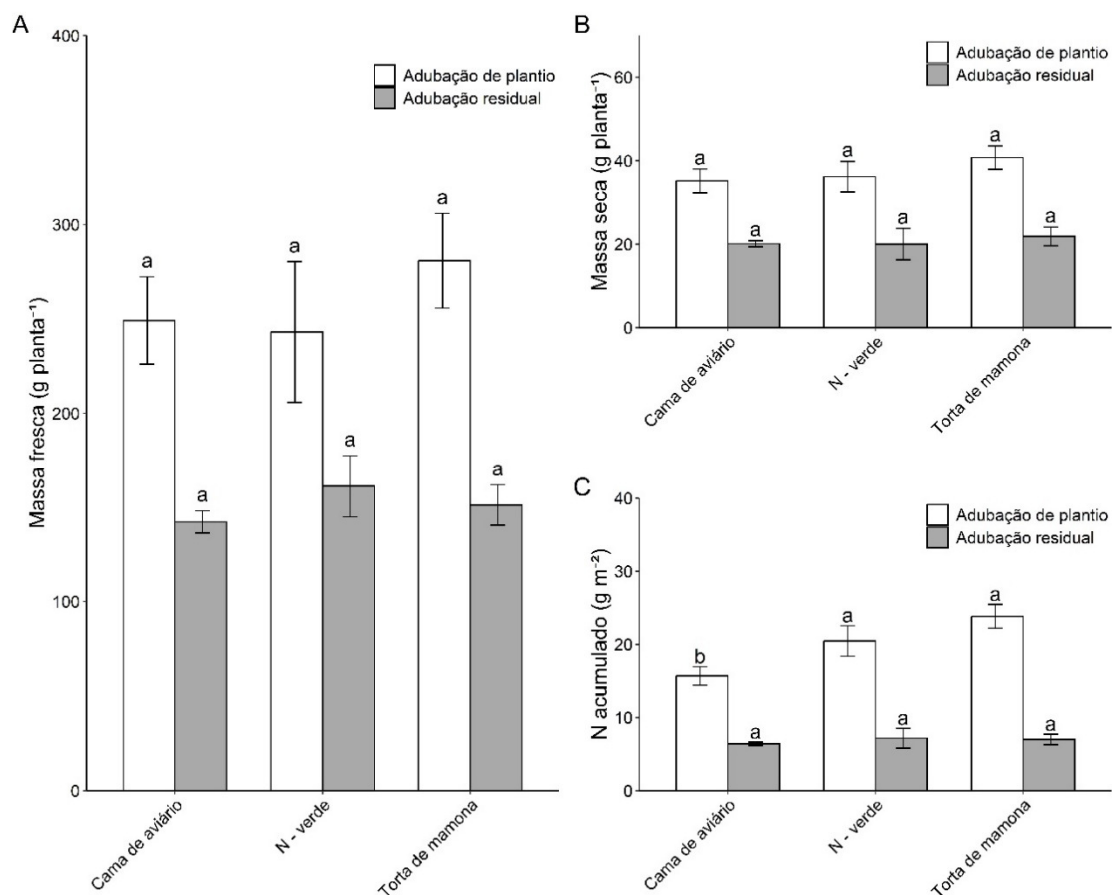


Figura 33. Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos nas doses de 300 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2022. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento, diferem entre si pelo teste de tukey no nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora.

No segundo ano de avaliação, a produção de massa fresca de alface reduziu em aproximadamente 10% em relação ao primeiro ano, mas sem diferenças entre as fontes de N para a dose de 100 kg ha⁻¹ (Figura 14). Por outro lado, na dose de 300 kg N ha⁻¹, a produção de matéria fresca de folhas com o uso de cama de aviário e N-verde foi muito próxima da obtida no primeiro ano, mas observou-se uma redução significativa da produção quando a fonte foi a torta de mamona, refletindo-se na produção de matéria seca e acumulação de N (Figura 15). Na adubação residual, a produção reduziu em aproximadamente 10%, indicando um menor efeito residual do primeiro para o segundo ciclo. O comportamento entre as doses se manteve, sendo que a acumulação de N pela alface adubada foi significativamente menor com a torta de mamona, fato que se manteve na adubação residual.

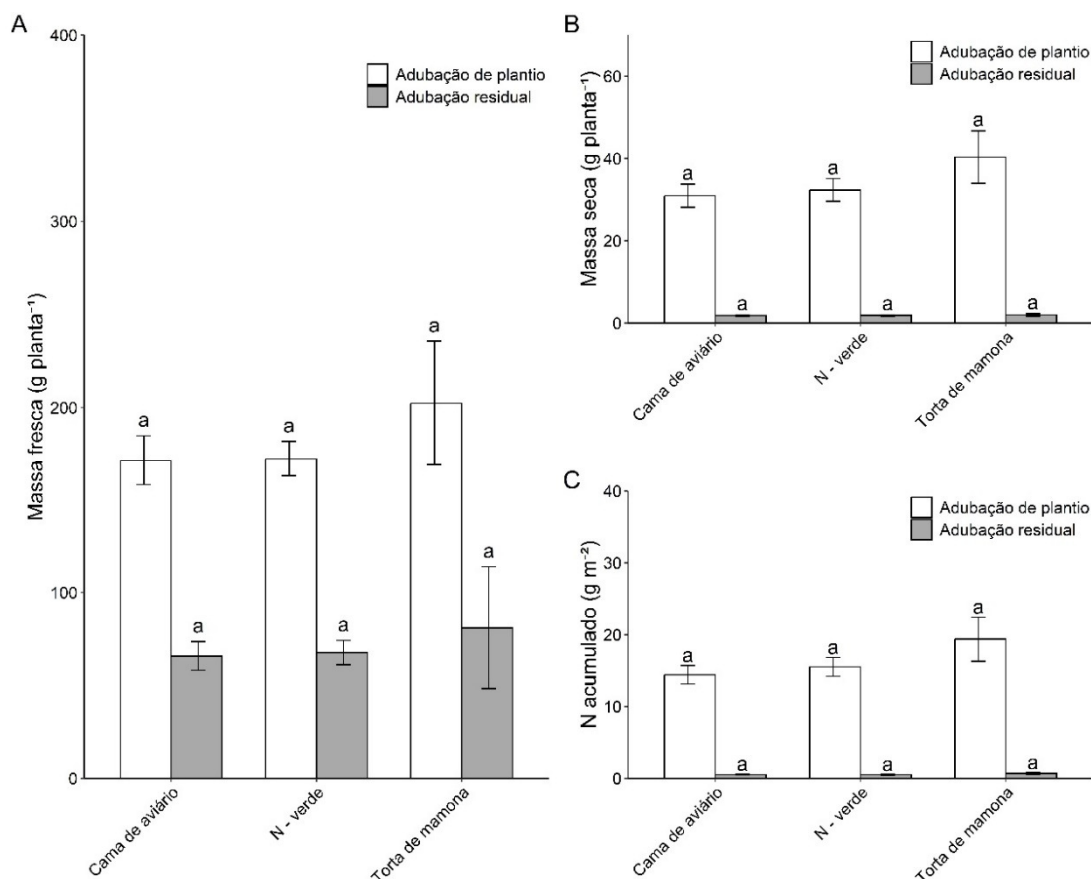


Figura 4. Parâmetros fitotécnicos da alfaca em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos na dose de 100 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2023. Médias seguidas de letras diferentes em cada tratamento diferem entre si pelo teste de tukey ao nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora.

Estes resultados de baixo rendimento da torta de mamona com a dose de 300 kg de N ha⁻¹ indicam que este fertilizante em doses altas, e aplicado pouco dias antes do plantio, representa um risco. A torta de mamona pode causar toxidez nas plantas (MONDAL et al., 2019; SEVERINO et al., 2007) estando associada aos altos níveis de sais presentes em sua composição (ARAGÃO et al., 2022; SILVA et al., 2012). De fato, após a implantação do segundo ano do experimento, parte das mudas necessitaram ser replantadas, mesmo assim observou-se um crescimento limitado nessa dose mais alta de 300 kg de N ha⁻¹. Cabe ressaltar que, baixos rendimentos com o adequado uso da torta de mamona são atípicos, havendo várias publicações que mostram o contrário, e que suportam seu uso em sistemas orgânicos pela alta concentração de N do produto (SILVA et al., 2013; SILVA et al., 2016).

Os resultados encontrados sustentam que o N-verde é uma opção de fonte de N equiparável a outras fontes tradicionalmente utilizadas na agricultura orgânica, sem os inconvenientes que algumas apresentam quando aplicadas em doses mais altas.

O segundo ciclo da alfaca, representado pela adubação residual, iniciado logo após a colheita do primeiro, dá uma indicação que a liberação de N do N-verde permanece ainda em níveis razoáveis de produção (CASSITY-DUFFEY et al., 2020), porém abaixo do necessário para manter a produtividade similar à do primeiro ciclo, necessitando de adubação suplementar. No mesmo campo experimental, estudando a alfaca crespa, (SOUZA JUNIOR et al., 2023) também encontraram resultado semelhante, porém utilizando um composto fermentado do tipo Bokashi, formulado com o resíduo de cervejaria combinado a farelo de gliricídia.

Embora estudos de campo indiquem que a adubação com folhas de gliricídia geralmente não resulta em um efeito residual importante, especialmente em baixas doses (SANTOS et al. 2010, 2017), a gliricídia na forma de N-verde parece não seguir este comportamento. No presente estudo, a peletização das folhas moídas pode ter contribuído para uma mineralização de N durante um prazo um pouco mais longo, alcançando o segundo ciclo de produção da alface. Esse efeito residual mais significativo contribuiu para atingir níveis parâmetros com padrões comerciais no primeiro e, com prospecção para reduzir o uso de insumos e assim contribui com uma agricultura mais sustentável (LAZICKI et al., 2020).

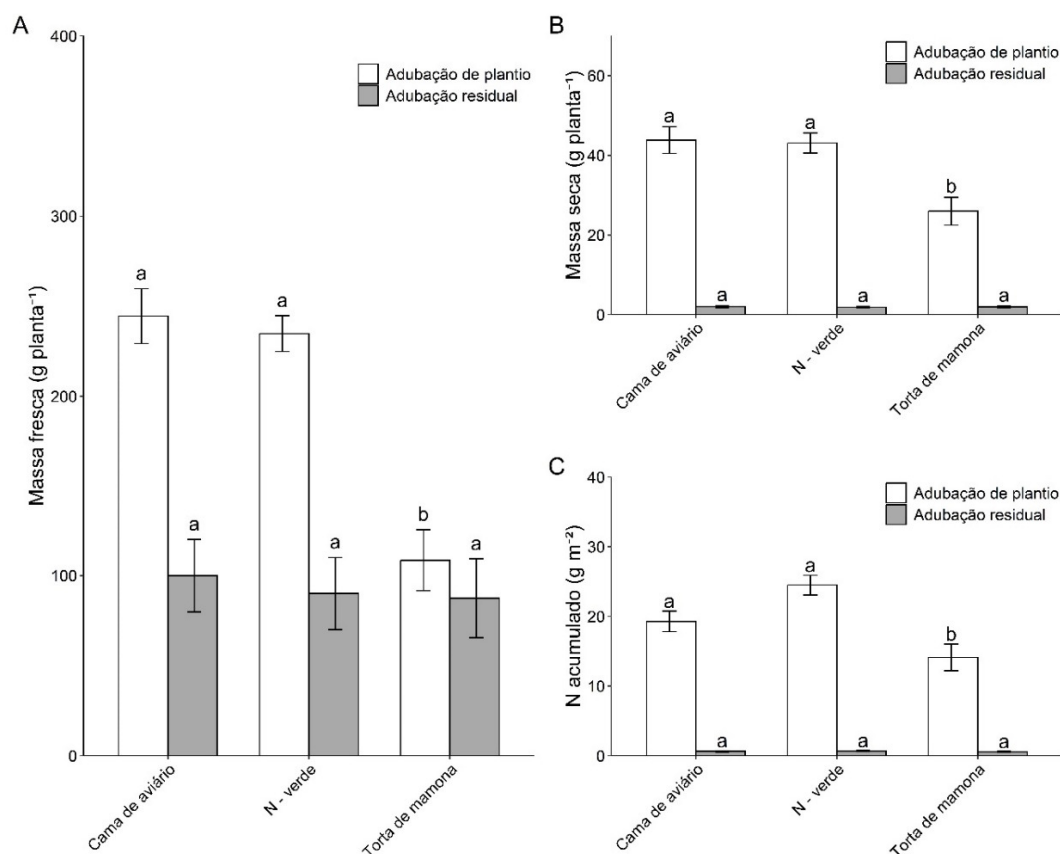


Figura 5. Parâmetros fitotécnicos da alface em resposta à aplicação de fertilizantes orgânicos na dose de 300 kg de N ha⁻¹, no ano agrícola de 2023. Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Seropédica, RJ. Fonte: Elaborado pela Autora.

Comparando-se a eficiência agrônômica dessas fontes, verifica-se que foram estatisticamente similares para os dois anos de avaliação, porém com uma redução em mais de 50% com o aumento da dose de 100 para 300 kg N ha⁻¹ (Figura 16B e 16D). Em geral, a eficiência agrônômica não varia na faixa em que existe uma resposta linear de produção ao incremento da dose de N, mas quando a resposta de produção começa a declinar, a eficiência agrônômica reduz tendendo a zero (VANLAUWE et al., 2011). Foi verificado no ensaio de curva de resposta (Figura 11) que o incremento das doses de N na forma de N-verde resultou em um ajuste quadrático, não havendo assim uma faixa de resposta linear, possivelmente pela alta fertilidade do canteiro onde a alface foi produzida. Logo, embora tenha havido resposta na produção de alface com o aumento da dose, a tendência esperada é a de redução da eficiência

agronômica com o aumento da dose de N, tal como verificado aumento significativo da dose de 100 para 300 kg N ha⁻¹.

A eficiência de recuperação de N no primeiro ano com 100 kg N ha⁻¹ (Figura 16A) foi estatisticamente similar entre as doses, fato que se repetiu no segundo ano (Figura 16C). No entanto, enquanto a recuperação média de N dos adubos ficou próxima de 70% no primeiro ano, no segundo ano, reduziu para pouco menos de 40% em média. Aumentando-se a dose de N para 300 kg ha⁻¹, a recuperação média de N pela alface ficou em 35% no primeiro ano, considerando o encontrado para a torta de mamona e N-verde, que não foram estatisticamente diferentes, porém acima dos 22% encontrado para cama de aviário. No segundo ano, ainda para a dose 300 kg ha⁻¹, a maior recuperação de N pela alface para de foi conseguida com o fornecimento de N-verde, que ficou próximo de 30%. A recuperação do N liberado da cama de aviário foi de 18%, significativamente mais baixo que o conseguido com N-verde, e o resultado para torta de mamona foi praticamente zero, pois as plantas prejudicadas, provavelmente pela salinidade, tiveram um desenvolvimento abaixo do controle não adubado.

Araújo et al. (2011) investigaram a eficiência de recuperação de N oriundo das palhadas de adubos verdes, tendo sorgo e as leguminosas feijão de porco e mucuna em avaliação, sendo aplicadas na produção orgânica de repolho, em um estudo com material enriquecido com o isótopo ¹⁵N. A taxa de recuperação do N aplicado por meio das palhadas variou de 9 a 16%, sendo a palhada de feijão de porco a de melhor eficiência de recuperação seguida da mucuna. As leguminosas, por apresentarem relação C/N menor, funcionaram melhor com fonte de N para o repolho, em comparação com o uso da palha de sorgo para adubação verde.

No presente estudo, a torta de mamona e o N-verde apresentavam menor relação C/N, e a cama de aviário uma relação C/N maior, o que ficou diretamente relacionado com a eficiência de recuperação de N. Embora usando materiais diferentes, PIAN et al. (2023) também constataram maior eficiência de recuperação de N quando o farelo de mamona foi usado para produzir composto orgânico do tipo Bokashi, superior ao composto que usou gliricídia, tendo o primeiro apresentado uma recuperação de N em torno de 50%, e 20% com o composto com gliricídia.

Não se pode descartar que fatores climáticos possam ter contribuído também para os resultados. Segundo (Acosta et al., 2014), o tempo de meia vida de um material vegetal pode aumentar em um intervalo de um ano em função da redução de precipitação, por exemplo. Neste sentido, o estudo (PAULA et al., 2015), conduzido em Seropédica (RJ) revelou que o tempo de meia-vida da gliricídia foi de 25 dias durante a estação seca, que se reduziu para 14 dias na estação chuvosa. Isso ajuda a explicar os baixos rendimentos de recuperação e produtividade da hortaliça no segundo ano, possivelmente afetados pelos fatores ambientais.

A maior eficiência agrônômica e de recuperação de N com a dose de 100 kg N ha⁻¹, em comparação à dose de 300 kg de N ha⁻¹, é um resultado esperado, pois em geral, com o aumento das doses de fertilizante ocorrem incrementos decrescentes na produção (VANLAUWE et al., 2011). No entanto, a dose de 100 kg de N ha⁻¹ não foi suficiente para atingir a produção máxima quando o N-verde foi utilizado, e talvez esse comportamento fosse o mesmo para a cama de aviário e para a torta. Por outro lado, com a dose mais elevada, de 300 kg de N ha⁻¹, o excedente de N, que não foi absorvido pela alface, pode ter sido perdido para o ambiente.

Enquanto grande preocupação existe quanto à lixiviação de nitrato no cultivo da alface (AGOSTINI et al., 2010), pouco se sabe a respeito das perdas por volatilização de amônia, que em geral podem alcançar níveis próximos a 50% do fertilizante aplicado. Por outro lado, as perdas por desnitrificação, especialmente pela emissão de N₂O, são bastante críticas, mesmo sendo uma pequena fração do N aplicado, pois é um gás de alto potencial de aquecimento global (MOTASIM et al., 2024).

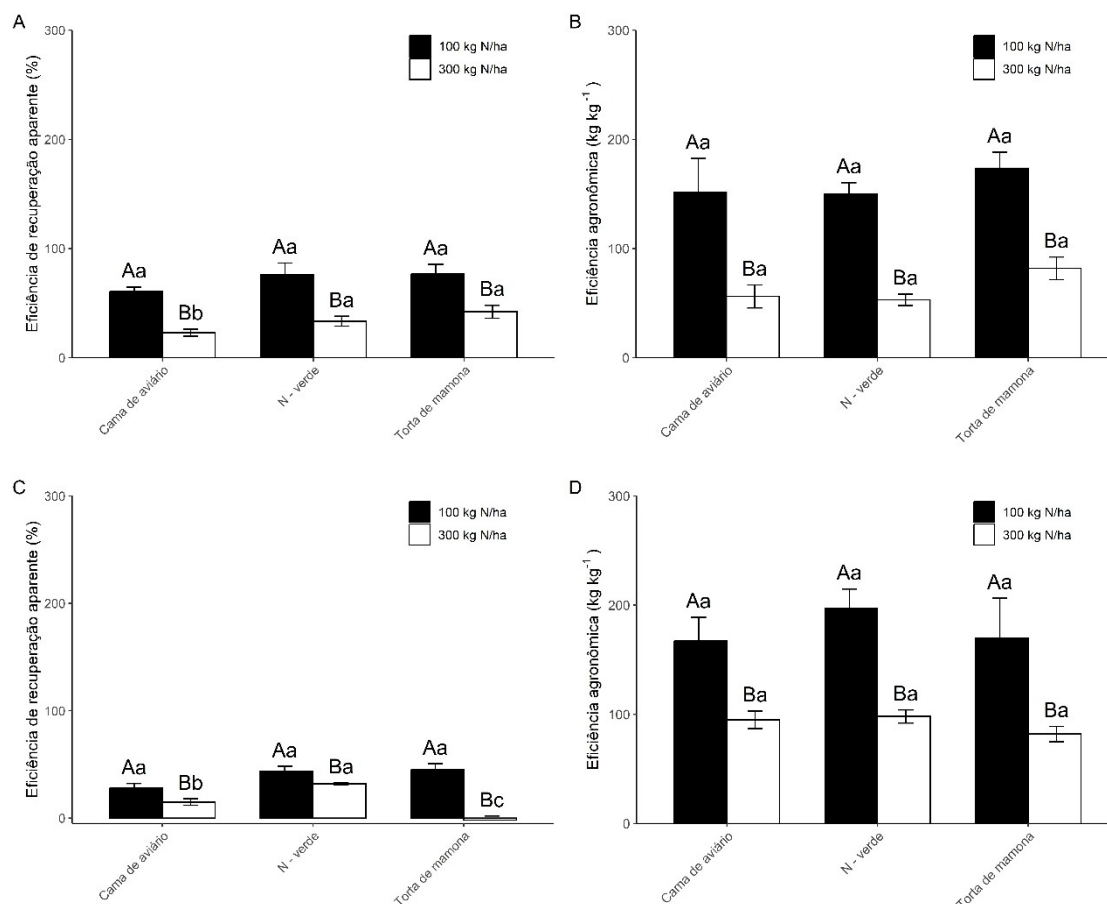


Figura 6. Eficiência agrônômica e de recuperação aparente de fontes de N na doses de 100 e 300 kg N ha⁻¹ na adubação de plantio da hortaliça em 2022(A e B) e 2023(C e D). Médias representadas por letras maiúsculas indicam o efeito das doses, enquanto letras minúsculas indicam o efeito do fertilizante dentro do nível de cada dose, conforme o teste de Tukey, com 5% de significância. Fonte: Elaborado pela Autora.

4.5.3 Desempenho agrônômico das fontes de N em dois anos de avaliação consecutiva

A comparação entre os anos baseou-se na média do experimento de campo, considerando todas as fontes de nitrogênio, com o objetivo de verificar se houve diferença significativa na produção entre os anos avaliados. Para isso, foram utilizados modelos mistos, que consideram medidas repetidas no tempo (Tabelas 3 e 4).

A análise indicou que alguns parâmetros agrônômicos apresentaram comportamento distinto entre os anos. A massa fresca e a eficiência de recuperação aparente, por exemplo, mostraram menor rendimento no segundo ano, independentemente da dose aplicada ($p > 0,05$) no primeiro ciclo. Essa redução pode ser atribuída às condições climáticas menos favoráveis nesse período, que se caracterizou por temperaturas mais elevadas e menor frequência de chuvas (Figura 10). Esses fatores interferem significativamente na produtividade de alface (FILGUEIRA, 2008).

Ao se considerar o efeito da adubação de plantio sobre a produção acumulada ao longo dos dois ciclos, observa-se que todos os parâmetros avaliados apresentaram redução no segundo ano na dose de 300 kg N ha⁻¹. Em contraste, a dose de 100 kg N ha⁻¹ foi menos afetada, especialmente na produção de massa fresca e seca (Tabelas 3 e 4). Dessa forma, o menor rendimento observado no segundo ano foi independente da fonte de N utilizada, sendo

influenciado predominantemente pelas condições ambientais, com reflexo mais significativo na adubação residual do segundo ano (Figuras 14 e 15).

No que se refere à avaliação do desempenho do N-verde sob diferentes condições climáticas (Tabela 3 e 4), destaca-se que as condições inerentes a cada ano agrícola não influenciaram significativamente o comportamento N-verde na dose de 100 kg N ha⁻¹, tanto na adubação de plantio para o primeiro ciclo quanto na produção acumulada. Na dose de 300 kg N ha⁻¹, esse comportamento se manteve para eficiência de recuperação e produção de massa fresca e seca na adubação de plantio. Já na produção acumulada, apenas o parâmetro de N acumulado não sofreu influência do ano sobre o desempenho do fertilizante. Assim, o desempenho do fertilizante durante a adubação de plantio do primeiro ciclo não apresentou dependência significativa das condições ambientais de cada ano. No entanto, quando se considera o desempenho da produção acumulada, essas condições passam a exercer maior influência, tornando o comportamento do fertilizante mais variável.

Ao comparar as médias de produção obtidas nos dois anos avaliados, o fertilizante N-verde demonstrou produtividade igual ou superior às demais fontes testadas. A dose de 100 kg N ha⁻¹ se mostrou uma estratégia mais eficiente, tanto pela estabilidade frente às variações ambientais quanto pelo menor custo de aquisição, acessibilidade a menores quantidades de fertilizantes e boa resposta de eficiência no primeiro ciclo. No entanto, para atingir níveis mais altos de produção, é recomendável considerar uma suplementação no segundo ciclo.

Esses resultados reforçam o potencial do N-verde como alternativa viável para agricultores que buscam insumos de fonte renovável, com desempenho de menor dependência às condições climáticas e maior previsibilidade de resposta, alinhado às práticas sustentáveis de manejo da adubação. Ainda assim, é necessário avançar em questões como a redução de custos e o aumento da acessibilidade do produto em escala comercial, o que depende de uma abordagem integrada entre a pesquisa científica e a transferência de tecnologias, visando tornar o fertilizante mais competitivo frente aos produtos convencionais disponíveis no mercado (MOURA et al., 2020).

Tabela 3. Desempenho médio da alface ao longo de dois anos agrícolas em cultivos sucessivos, adubada com diferentes fontes de nitrogênio na dose de 100 kg N ha⁻¹.

Parâmetros agrônômicos	Fonte de Nitrogênio (FN)	Adubação de plantio (1º ciclo)				Adubação total (1º+2º ciclo)			
		Médias gerais	EPM	Ano	Fertilizante *Ano	Médias	EPM	Ano	FN *Ano
		<i>p-valor</i>				<i>p-valor</i>			
Massa fresca (g planta ⁻¹)	N-verde	192 a	10,1	<0,001	0,1614	225,8 a	9,3	0,6464	0,4476
	Cama de aves	200,1a	14,4		0,0747	237,9 a	16,3		0,9758
	Torta de mamona	221,7 a	21,3		0,1650	262,2 a	31,6		0,2637
	Controle	102,4 b	19,5		0,0083	123,6 b	16,5		0,3489
Massa seca (g planta ⁻¹)	N-verde	34,8 ab	2,1	0,4717	0,3307	36,70 ab	2,19	0,4721	0,3300
	Cama de aves	32,4 ab	1,8		0,5510	34,2 b	1,88		0,5766
	Torta de mamona	42,1 a	3,4		0,4967	44,1 a	3,45		0,4953
	Controle	28 b	2,1		0,4160	29,90 b	2,02		0,4350
N acumulado (g m ⁻²)	N-verde	15,77 b	0,70	0,0103	0,8458	18,71 bc	1,17	<0,001	0,0661
	Cama de aves	24,20 a	3,50		<0,001	25,29 a	3,69		<0,001
	Torta de mamona	18,72 ab	1,73		0,6277	22,08 ab	1,97		0,1613
	Controle	12,58 c	1,28		0,1064	16,21 c	1,16		0,5534
Eficiência de recuperação aparente (%)	N-verde	50,3 ab	6,8	0,002	0,2359	-	-	-	-
	Cama de aves	36,6 b	5,5		0,1262	-	-		-
	Torta de mamona	61 a	6,7		0,0059	-	-		-
Eficiência agrônômica (kg/kg)	N-verde	146,4 a	19,5	0,0572	0,1014	-	-	-	-
	Cama de aves	159,2 a	18,1		0,7201	-	-		-
	Torta de mamona	186,0 a	29,2		0,1828	-	-		-

‘Médias’ correspondem à média geral das FN nos anos de 2022 e 2023. ‘Ano’ representa o efeito dos anos sobre a resposta das FN, enquanto a interação ‘FN × Ano agrícola’ indica o efeito do ano sobre o rendimento das FN. Os índices de eficiência foram calculados apenas para o 1º ciclo. EPM: erro padrão da média.

Tabela 4. Desempenho médio da alface ao longo de dois anos agrícolas em cultivos sucessivos, adubada com diferentes fontes de nitrogênio na dose de 300 kg N ha⁻¹.

Parâmetros agronômicos	Fonte de Nitrogênio (FN)	Adubação de plantio				Adubação total (1º+2º ciclo)			
		Médias	EPM	Ano	Fertilizante *Ano	Médias	EPM	Ano	FN *Ano
		<i>p-valor</i>				<i>p-valor</i>			
Massa fresca (g planta ⁻¹)	N-verde	238,9 a	18,25	<0,001	0,7556	364,4 a	29,5	<0,001	0,024
	Cama de aves	246,8 a	13,08		0,8612	367,9 a	17,0		0,173
	Torta de mamona	194,6 b	32,06		<0,001	313,8 a	43,0		<0,001
	Controle	102,4 c	19,46		0,0060	172,9 b	27,6		<0,001
Massa seca (g planta ⁻¹)	N-verde	47,4 a	2,85	0,552	0,0915	49,3 a	2,80	<0,001	0,0248
	Cama de aves	37,4 b	3,0		0,0139	39,3 a	3,0		0,1732
	Torta de mamona	33,1 b	4,2		0,0067	35,1 a	4,2		<0,001
	Controle	28 b	2,13		0,4033	29,9 b	2,02		<0,001
N acumulado (g m ⁻²)	N-verde	22,50 a	1,36	0,544	0,004	26,42 a	1,48	<0,001	0,0615
	Cama de aves	17,25 b	1,17		0,004	20,62 b	1,01		0,2908
	Torta de mamona	18,98 b	2,00		<0,001	22,72 b	2,90		<0,001
	Controle	10,38 c	1,00		1,00	16,21 c	1,16		0,1942
Eficiência de recuperação aparente (%)	N-verde	33,1 a	2,24	<0,001	0,8035	-	-	-	-
	Cama de aves	16,3 b	2,17		0,6053	-	-		-
	Torta de mamona	21,3 b	8,52		<0,001	-	-		-
Eficiência agrônômica (kg/kg)	N-verde	75,4 a	8,49	0,110	<0,001	-	-	-	-
	Cama de aves	75,4 a	8,87		0,0029	-	-		-
	Torta de mamona	47,5 b	10,2		<0,001	-	-		-

‘Médias’ correspondem à média geral das FN nos anos de 2022 e 2023. ‘Ano’ representa o efeito dos anos sobre resposta de produção, enquanto a interação ‘FN × Ano agrícola’ indica o efeito do ano sobre o desempenho das FN. Os índices de eficiência foram calculados apenas o 1º ciclo. EPM: erro padrão da média.

4.6 CONCLUSÕES

O fertilizante à base de biomassa de gliricídia, N-verde, proporciona uma produção de alface similar ou mesmo superior à alcançada com a aplicação de fontes tradicionais como a torta de mamona e a cama de aviário, o que se reflete na eficiência agronômica e na eficiência de recuperação do N aplicado. O desempenho do N verde não foi dependente dos fatores ambientais, revelando mais estabilidade frente às condições ambientais variáveis.

A dose de N-verde que proporciona maior produtividade de alface pode ser estimada como 250 kg N ha⁻¹, considerando os resultados de 262 e 249 kg N ha⁻¹ obtidos nos dois anos de avaliação. O efeito residual para um ciclo consecutivo de alface supre apenas parcialmente o requerimento da cultura.

5. CAPÍTULO III

EMISSÃO DE ÓXIDO NITROSO E AMÔNIA DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS NA PRODUÇÃO DE ALFACE

5.1 RESUMO

Os sistemas de produção de baixo insumo enfrentam limitações quanto à disponibilidade de fontes eficientes de nitrogênio (N). O fertilizante N-verde, produzido a partir da peletização de biomassa de *Gliricidia sepium*, apresenta elevado potencial para suprir essa demanda, oferecendo uma opção renovável e tecnicamente viável para agricultura orgânica e familiar. Porém, pouco se sabe sobre os efeitos das emissões de fontes de N naturalmente orgânicas. Este capítulo avalia as emissões de óxido nitroso (N₂O) e amônia (NH₃) de fontes de N naturalmente orgânicas no cultivo de alface. Os fertilizantes avaliados foram N-verde (produzido pela peletização de biomassa de gliricidia), cama de aviário compostada e torta de mamona. Câmeras estáticas foram utilizadas para medir as perdas gasosas por dois anos consecutivos. Os dados de volatilização do NH₃ e N₂O foram submetidos a regressão não linear usando um modelo logístico e sigmoidal, respectivamente. As emissões de N₂O do solo variaram de 2,7 a 580,62 µg m² h⁻¹. Fluxos diários mais expressivos foram mais frequentes na adubação com torta de mamona nos estudos de campo. A fração de N perdida como N₂O da cama de aviário e N-verde ficaram abaixo de 1%. A incorporação manual dos fertilizantes nas covas de plantio contribuiu com menores perdas de N por volatilização de NH₃ e N₂O. As emissões de NH₃ foram maiores no segundo ano, enquanto as de N₂O foram mais elevadas no primeiro ano. O fator de emissão de N₂O e de NH₃ da torta de mamona foi, no mínimo, dez vezes superior ao observado para o N-verde e a cama de aviário compostada. A aplicação do fertilizante N-verde representa um insumo sem risco biológico e com menores perdas de nitrogênio em relação à torta de mamona.

Palavras-chave: Efeito estufa. Sustentabilidade. Adubação orgânica.

5.2 ABSTRACT

Low-input production systems face limitations regarding the availability of efficient nitrogen (N) sources. The N-verde fertilizer, produced by pelletizing biomass of *Gliricidia sepium*, shows great potential to meet this demand, offering a renewable and technically viable option for organic and small-scale farming. However, little is known about the emission effects of naturally organic nitrogen sources. This chapter evaluates nitrous oxide (N₂O) and ammonia (NH₃) emissions from naturally organic N sources in lettuce cultivation. The fertilizers assessed were N-verde (produced from pelletized gliricidia biomass), composted poultry litter, and castor bean cake. Static chambers were used to measure gaseous losses over two consecutive years. NH₃ and N₂O volatilization data were analyzed through nonlinear regression using logistic and sigmoidal models, respectively. Soil N₂O emissions ranged from 2.7 to 580.62 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Higher daily fluxes were more frequent with castor bean cake fertilization in the field studies. The fraction of N lost as N₂O from poultry litter and N-verde remained below 1%. Manual incorporation of fertilizers into planting holes contributed to lower N losses through NH₃ and N₂O volatilization. NH₃ emissions were higher in the second year, while N₂O emissions peaked in the first year. The N₂O and NH₃ emission factors from castor bean cake were at least ten times higher than those observed for N-verde and composted poultry litter. The application of N-verde fertilizer represents an input with no biological risk and lower nitrogen losses compared to castor bean cake.

Keywords: Greenhouse effect. Sustainability. Organic fertilization.

5.3 INTRODUÇÃO

O fornecimento de nitrogênio (N) é um fator determinante para a produtividade agrícola, especialmente na agricultura familiar e para agricultura orgânica, nos quais o uso de fertilizantes sintéticos é restrito ou proibido. No Brasil, a agricultura familiar é responsável por cerca de 70% da produção de alimentos (FARIA et al., 2024) e a agricultura orgânica está em crescente expansão (WILLER et al., 2023). Grande parte desses alimentos são destinados à produção de hortaliças, cujo sistema de produção desempenha papel importante na segurança alimentar e nutricional.

Fontes de N como a torta de mamona, esterco de animais e adubos verdes são tradicionalmente utilizadas produção de hortaliças (SILVA et al., 2024). Embora essas fontes promovam a ciclagem de nutrientes e a saúde do solo, não estão isentas de impactos ambientais (LUO et al., 2025). Devido ao baixo teor de N desses insumos, é comum sua aplicação em altas doses, o que pode ampliar as emissões gasosas (GUERRA et al., 2013; LEAL et al., 2013). A escassez de dados sobre essas perdas, aliada à falta de recomendações padronizadas de aplicação, dificulta o manejo adequado dessas fontes e a mitigação de seus impactos (LEAL et al., 2013; 2018).

O N presente nesses fertilizantes é gradualmente mineralizado no solo, tornando-se disponível às plantas. Contudo, parte desse N pode ser transformada por processos microbianos como nitrificação e desnitrificação, resultando na emissão de óxido nitroso (N_2O), um potente gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global cerca de 300 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) (BAGGS et al., 2000; DOBBIE e SMITH, 2003).

Além do N_2O , destaca-se a volatilização de amônia (NH_3) como importante via de perda gasosa de N. Esse processo, caracterizado pela passagem do NH_3 do solo para a atmosfera, está associado à baixa eficiência da adubação e pode representar aumento nos custos de produção (ARAÚJO et al., 2009; ROCHA et al., 2019; STAFANATO et al., 2013). Apesar da amônia não ser considerada um gás de efeito estufa, ela atua como precursora de aerossóis finos ($PM_{2,5}$) e pode ser redistribuída e depositada em áreas distantes, contribuindo indiretamente para novas emissões de N_2O (PAN et al., 2016; ZHANG et al., 2018). Portanto, emissões elevadas de NH_3 representam redução na eficiência agrônômica e custos ambientais significativos (SIGNOR e CERRI, 2013; WANG et al., 2021).

A magnitude dos fatores de emissão de nitrogênio (N) ainda não é totalmente compreendida, pois a previsão é limitada pela dinâmica presente no solo, uma vez, que os fertilizantes orgânicos influenciam fortemente os processos microbianos responsáveis pela liberação de N_2O , resultando em valores variáveis e, muitas vezes, distantes dos padrões sugeridos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (LUO et al., 2025). Por exemplo, na região Sudeste do Brasil, Sant'Anna et al. (2018) encontraram emissões de N_2O entre 0,58% e 0,72% do N aplicado por adubos verdes, valores inferiores ao fator padrão de 1% previsto pelo IPCC. Já a meta-análise conduzida por Charles et al. (2017), que reuniu 38 estudos em 12 países, estimou um fator médio de emissão de N_2O de $0,57 \pm 0,30\%$ para fertilizantes orgânicos. Por sua vez, Rosa et al. (2018) observaram um fator de emissão de $0,27 \pm 0,17\%$ na aplicação de esterco bovino compostado em sistema rotativo de hortaliças no sudeste da Austrália, valor 3,7 vezes menor que o padrão do IPCC. Quando se trata das perdas pela emissão de NH_3 por fertilizantes orgânicos, os resultados de pesquisas são ainda mais restritos. Rocha et al. (2019) registraram perdas entre 3% e 38% para fontes como esterco, torta de mamona e resíduos de leguminosas na mesma região do Sudeste do Brasil.

Diante das poucas opções de fontes orgânicas de N eficientes e acessíveis para sistemas de produção familiar de base ecológica, destaca-se o fertilizante N-verde, que é desenvolvido partir da biomassa de *Gliricidia sepium*, processada em forma de pellets. Esse insumo possui liberação de N padronizada, origem planejada e uso mecanizável, cujas características são raras

entre fontes de N para agricultura orgânica (REZENDE, 2023). Esses atributos posicionam o produto como um elo entre sustentabilidade, produtividade e viabilidade econômica para produtores orgânicos e familiares.

No entanto, as perdas gasosas associadas ao uso do N-verde ainda são pouco conhecidas, especialmente em relação às emissões de NH_3 e N_2O . Essa lacuna compromete a avaliação do seu impacto ambiental. Assim, o presente estudo teve como objetivo quantificar as emissões de N_2O e NH_3 decorrentes da aplicação do N-verde, comparando seus efeitos com outras fontes orgânicas amplamente utilizadas na produção de alface, como a torta de mamona e a cama de aviário compostada.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1 Área de estudo, delineamento experimento e descrição dos tratamentos

O experimento foi conduzido nos anos de 2022 e 2023, em área experimental pertencente ao Sistema Integrado de Produção Agroecológica – SIPA, na Fazendinha Agroecológica Km 47, localizado no município de Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, entre os paralelos 22° 49' e 22° 45' S e os meridianos 43° 23' e 43° 42' O, em altitude média de 33 m, na Baixada Fluminense. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw (Clima tropical com estação seca). O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (SANTOS et al., 2018).

O solo apresentou na camada de 0,0 a 0,2 m a seguinte constituição química: pH em H₂O: 6,4; Al: 0 cmolc dm⁻³; Ca+Mg: 4,3 cmolc dm⁻³; P: 125,8 mg dm⁻³, K: 180,5 mg dm⁻³, N: 0,9 g.kg⁻¹ e COT: 11 g.kg⁻¹. A determinação do pH e os teores de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e alumínio foi realizada segundo os métodos descritos em Embrapa (2017).

O estudo foi em delineamento em blocos ao acaso, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram em aplicações de N verde, cama de aviário e torta de mamona na dose de 100 kg de N ha⁻¹ (Tabela 5), e, um tratamento sem adubação designado como controle. Os fertilizantes orgânicos foram aplicados somente na adubação de base alface (cultivar Vera). O estudo de campo abrangeu dois cultivos consecutivos da hortaliça de sessenta dias. No segundo ciclo, não foi realizada adubação de base, sendo o fornecimento de N proveniente do resíduo da adubação aplicada no primeiro ciclo. A repetição do experimento no ano seguinte, sob as mesmas condições foi realizada para avaliação das emissões em dois anos consecutivos.

O N-Verde foi obtido e processado conforme descrito no capítulo anterior, foram utilizadas apenas as folhas da gliricídia, sendo fragmentadas em picadeira acoplada a trator. Em seguida, todo o material foi disposto sobre lona plástica para secagem ao sol. Após a secagem, a biomassa foi finamente moída e, então, encaminhada à máquina peletizadora para ser transformada em pellets (REZENDE, 2023). Concluída essa etapa, o produto está pronto para ser uso e armazenagem.

A cama de aviário, constituída de uma mistura de maravalha e dejetos de frangos, foi compostada antes de sua utilização. Foi fornecida por um produtor orgânico, tendo sido oriunda de unidade familiar de base agroecológica da Região Serrana do Estado do RJ, Brazil. A torta de mamona foi adquirida diretamente da indústria.

Tabela 3. Teor de nitrogênio (%) e a Relação C/N e quantidade aplicada dos fertilizantes orgânicos adotados no estudo nos anos de monitoramento. Seropédica, RJ, Brasil.

Fertilizante	2022			2023		
	Relação C/N	Teor de N (%)	(g planta ⁻¹)	Relação C/N	Teor de N (%)	(g planta ⁻¹)
N verde	12	3,6	17,1	13	3,3	18,8
Torta de mamona	5	6,8	9,1	7	6,9	9,1
Cama de aviário	16	1,7	36,5	17	1,7	35,0

*A quantidade aplicada corresponde à aplicação de fertilizante fornecida a cada planta de alface, referente à dose de 100 kg de N ha⁻¹.

5.4.2 Emissão de N₂O no cultivo de alface em dois ciclos sucessivos

As amostragens de gases para a determinação dos fluxos de N₂O foram realizadas após a adubação dos fertilizantes no cultivo de alface e compreenderam o período dos dois ciclos consecutivos da alface. As 20 câmaras estáticas fechadas foram instaladas, perpendicularmente à direção das linhas de plantio. Cada câmara foi constituída de uma base de metal retangular (40 x 60 cm), com 10 cm de altura, sendo inserida no solo na profundidade de 5 a 7 cm, sendo inseridas quatro plantas em cada câmara. Durante as amostragens foi colocada uma tampa sobre as bases das câmaras, com intuito de isolar o ambiente interno do meio externo.

As amostras de gases provenientes do solo foram coletadas em seringas de nylon de 60 mL, em intervalos de tempo pré-estabelecidos (0, 20, 40 e 60 min). As coletas dos gases foram realizadas uma vez ao dia, no período da manhã, em torno das 9 h, onde é mais provável encontrar as emissões médias do dia (ALVES et al., 2012). As amostragens de gases para a determinação dos fluxos de N₂O foram diárias durante 15 dias. A partir de então foram coletadas cada três dias por mais 15 dias, posteriormente semanalmente até que não se percebeu mais diferença significativa entre os fluxos dos tratamentos.

Em cada evento de amostragem, também foram medidas a temperatura do ar no início e final das coletas. Também foram medidas as temperaturas do solo a 5 cm de profundidade. As análises para determinação das concentrações de N₂O foram analisadas no laboratório de Cromatografia Gasosa da Embrapa Agrobiologia, utilizando um cromatógrafo de gás (Perkin Elmer, Autosystem). Os fluxos de gases (F) foram calculados pela Equação 1:

$$f = \frac{dC}{dt} \times \frac{V}{A} \times \frac{m}{V_m} \quad (1)$$

Onde f é o fluxo em $\mu\text{g N}_2\text{O-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, dC é a variação na concentração do gás durante o período de incubação, em $\mu\text{L L}^{-1}$; dt é o tempo de incubação, em horas; V é o volume da câmara, em litros (L); A é a área do solo coberta pela câmara, em metros quadrados (m^2); m é a massa molecular de N no N₂O (28 g mol⁻¹), V_m é o volume molecular em condições normais de pressão e temperatura (CNTP), em litros por mol (L mol⁻¹).

Para determinar a emissão acumulada de N-N₂O no período da avaliação, foi calculado o somatório das emissões de cada intervalo de coletas que ocorreram em sequência. A emissão durante o intervalo entre coletas foi determinada pelo método da área do trapézio, que consiste no produto do fluxo médio de N-N₂O entre as duas coletas e o intervalo de tempo entre essas coletas.

O cálculo dos fatores de emissão (FE), é a razão da diferença entre a emissão de N-N₂O acumulado dos tratamentos que receberam as fontes de N da emissão basal (tratamento controle), sobre a massa de N aplicado nas parcelas que receberam fonte de N.

5.4.3 Volatilização de NH₃

Simultaneamente à avaliação de emissão de N₂O, ocorreu a quantificação das perdas de N por volatilização de NH₃, por meio de um sistema semiaberto livre estático (SALE), adaptado e calibrado por ARAÚJO et al. (2009). Essa câmara consiste num frasco transparente do tipo PET, de dois litros, com a base cortada e diâmetro de 10 cm, compondo uma área de 0,008 m². Uma lâmina de espuma de polietileno com 2,5 cm de largura e 25 cm de comprimento umedecida com solução de H₂SO₄ 1,0 mol dm⁻³ + glicerina 2% (v/v) foi suspensa no interior do frasco com auxílio de um arame inoxidável. As câmaras foram inseridas no centro de cada

parcela incluindo quatro plantas de alface e somente foram retiradas para trocar a lâmina de espuma.

A espuma e a solução residual em cada frasco de 50 mL foram transferidas para tubos de Erlenmeyer de 125 mL, previamente pesados (P1). Em seguida, 40 mL de água destilada foram adicionados a cada tubo. Os tubos contendo a solução e a espuma foram colocados em um agitador horizontal a 220 rpm por 20 min. Posteriormente, os tubos foram retirados do agitador e pesados novamente (P2). Uma alíquota de 5 a 10 mL, dependendo da concentração esperada de NH_4^+ , foi analisada por destilação a vapor e titulação subsequente, para quantificar o N amoniacal, conforme o método de Alves et al. (1994).

As coletas foram realizadas após 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20 e 30 dias após a adubação com N. A partir desses resultados, foram calculadas as taxas diárias de volatilização ($\text{mg N-NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), bem como o fator de emissão e a emissão acumulada de N- NH_3 , cujas fórmulas foram as mesmas utilizadas para N- N_2O .

5.4.4 Análise estatística

Foi realizada a regressão não linear para descrever a emissão de N- N_2O acumulada a partir das emissões diárias medidas durante o estudo, tanto para 2022 quanto 2023. Foi selecionado o modelo logístico, conforme a Equação 2 a seguir:

$$\int(x) = \gamma_0 + \frac{a}{1 + \left(\frac{\text{dia}}{x_0}\right)^b} \quad (2)$$

Onde y é a emissão acumulada de N- $\text{N}_2\text{O} \text{ m}^{-2}$; a é o intercepto, ou seja, quando a emissão de N- $\text{N}_2\text{O} \text{ m}^{-2}$ é igual a 0; b é o coeficiente de inclinação associado ao termo (dia), ou seja, indica a taxa de variação de N- $\text{N}_2\text{O} \text{ m}^{-2}$ em relação ao logaritmo natural do tempo em dias (d).

Para a emissão acumulada de NH_3 , o modelo de melhor ajuste foi o não linear logístico com quatro parâmetros (y_0 , x_0 , a e b) representado pelo modelo a seguir:

$$y = y_0 + \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{d-x_0}{b}\right)}$$

Onde y é a emissão acumulada de N- $\text{N}_2\text{O} \text{ m}^{-2}$ ao longo do tempo; y_0 é o mínimo assintótico, define o ponto de partida da curva; x_0 é o ponto de inflexão, momento de máxima emissão diária de N- N_2O , a é a amplitude da curva, representa a variação máxima da curva e controla a sua altura, ou máximo acumulado; b é a inclinação da curva ou taxa de emissão, maiores valores de b representam uma curva mais gradual, enquanto que valores menores representa uma transição mais abrupta, d o tempo em dias. Inicialmente, foi feito o ajuste geral para todos os tratamentos, usando valores iniciais (start) definidos com base nos pontos médios da curva.

Modelos logísticos tem sido utilizado recentemente para volatilização de amônia (CASSIM et al., 2021, 2022). Posteriormente, modelos separados foram ajustados para cada tratamento, utilizando a função nlsList. Os modelos foram ajustados com auxílio do pacote nmle do software R. Os tratamentos foram eleitos como efeito fixo dos parâmetros e as parcelas como efeito aleatório dos parâmetros. Para comparar os tratamentos, contrastes foram definidos para os parâmetros do modelo (y_0 , a , x_0 , b) e testados utilizando a função glht. Intervalos de

confiança para os parâmetros fixos foram calculados e visualizados em gráficos com estimativas pontuais e barras de erro. Por fim, foi gerada uma predição de valores ajustados com bandas de confiança para cada tratamento, baseada nas matrizes de gradientes parciais e na matriz de covariância do modelo final. Gráficos ilustram as curvas ajustadas.

Os resultados referentes aos fatores de emissão de N_2O e NH_3 foram submetidos à análise de modelos mistos. Também foi realizada a análise de resíduos para garantir a validade do modelo, em que foram testadas a normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias por meio de testes Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Os tratamentos e os anos foram considerados efeitos fixos, enquanto os blocos foram tratados como efeito aleatório. Assim, foi adotada uma estrutura de covariância composta simétrica (Compound Symmetry) para modelar a dependência entre os anos dentro da mesma unidade experimental para o efeitos dos fertilizantes. O modelo foi ajustado pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML), utilizando o pacote nlme no software R. As médias ajustadas (LSMEANS) foram comparadas pelo teste de tukey, adotando-se 5% de significância ($p < 0,05$).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante os ciclos de cultivo da alface, foram registradas temperaturas médias do ar de 21,3 °C em 2022 e 23,4 °C em 2023, com máximas de 26,5 °C e mínimas de 15,6 °C em 2022 e máximas de 31,1 °C e mínimas de 16,9 °C em 2023. A temperatura média do solo foi de 24,8 °C e 27,9 °C, respectivamente. A precipitação total durante os períodos avaliados foi de 62 mm em 2022 e 50 mm em 2023, sendo 8,4 mm e 45 mm nos primeiros 15 dias após a adubação (Figura 17).

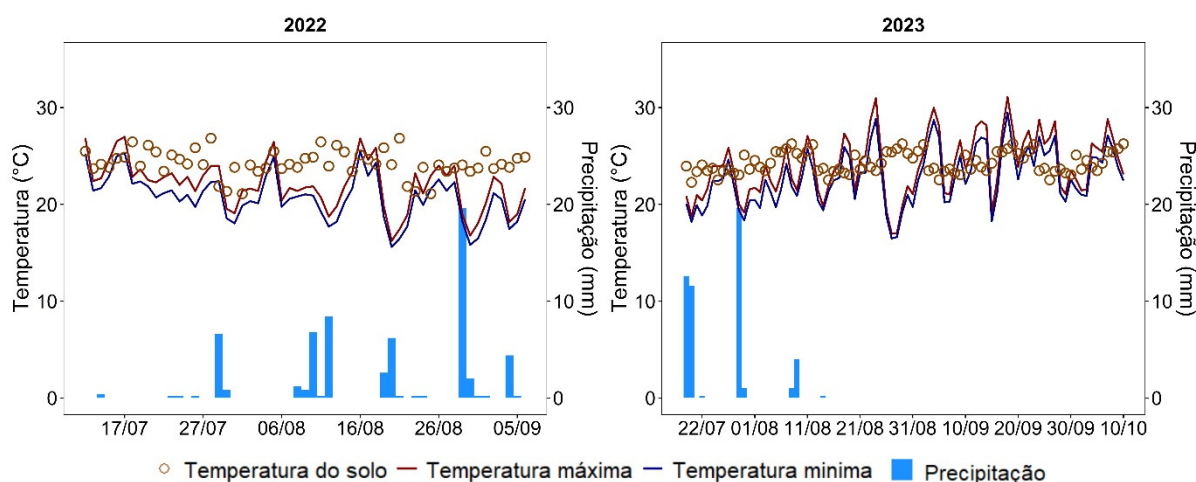


Figura 7. Dados diários de temperatura do ar e do solo (C°) e eventos de precipitação em (mm) em função do ano agrícola que foi realizada a adubação de fertilizantes orgânicos. Seropédica, RJ, Brasil. Fonte: Elaborado pela Autora.

Os fluxos de N₂O mais expressivos ocorreram entre 10 e 15 dias após a aplicação dos fertilizantes, coincidindo com o período de plantio recente da alface, o que pode ter estimulado os processos microbianos de nitrificação e desnitrificação no solo (SKINNER et al., 2014). Os fluxos variaram de 125 a 206 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em 2022 e de 118 a 360 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em 2023 (Figura 18), corroborando a literatura que aponta as duas primeiras semanas após a fertilização como período crítico para emissão de N₂O (BERGSTROM et al., 2001; LIU et al., 2005; SCHILS et al., 2008).

Os maiores picos foram observados nos tratamentos com torta de mamona, alcançando picos de 544 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em 2022 e 286 $\mu\text{g N m}^{-2} \text{h}^{-1}$ em 2023. A frequência de fluxos elevados neste tratamento foi observada nos dois anos. Resultados semelhantes foram reportados por Silva et al. (2013), que identificaram maiores fluxos de N₂O com aplicação de torta de mamona em hortaliças, enquanto o uso combinado de esterco bovino e esterco de aves resultou em emissões mais baixas. A boa aeração proporcionada pelos canteiros e as temperaturas do solo entre 20–30 °C podem ter favorecido a nitrificação (SIGNOR e CERRI, 2013), processo que, quando estável (Figura 18), tende a gerar também maior estabilidade e baixos fluxos de N₂O (KHALIL et al., 2004). Portanto, possivelmente os picos de N₂O por essa via ocorreram após eventos de precipitação e pela irrigação diária, os quais favorecem a formação de microssítios anaeróbios no solo, responsáveis pela produção de N₂O por desnitrificação (GENG et al., 2021).

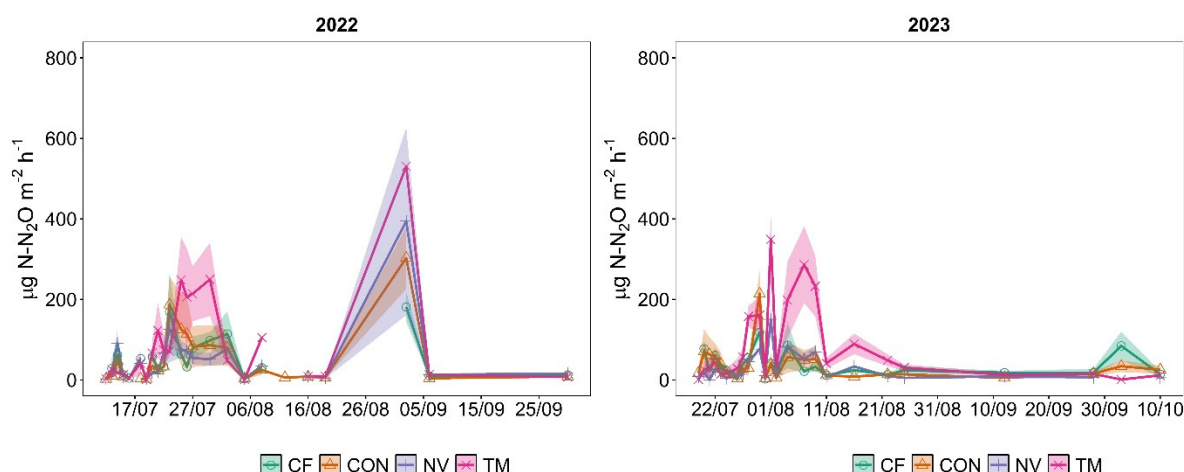


Figura 18. Fluxos de N-N₂O µg m⁻² dia⁻¹. Faixas em transparência representam o erro padrão da média (n=5). CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona. Fonte: Elaborado pela Autora.

A emissão acumulada de N₂O nos dois anos de avaliação (2022 e 2023) revelou parâmetros importantes ajustados pelo modelo de regressão, os quais ajudam a explicar o comportamento das emissões conforme as diferentes fontes de N (Figura 19A e 19B).

A amplitude da curva foi significativamente maior na adubação com torta de mamona, indicando maiores perdas de N₂O para o ambiente (Figura 19B). Esse parâmetro expressa a diferença entre os valores mínimo e máximo de emissão, refletindo a magnitude total da emissão ao longo do tempo. No que se refere à inclinação da curva, a torta de mamona novamente apresentou os maiores valores, sugerindo uma liberação mais rápida e intensa de N₂O após a adubação (Figura 19B). Por outro lado, a cama de aviário exibiu a menor inclinação, indicando que a emissão foi mais lenta e gradual, o que pode estar associado a uma liberação de N mais controlada devido a estabilidade química desse fertilizante após a compostagem (DE ROSA et al., 2018).

Por sua vez, o ponto de inflexão representa o número de dias após a adubação em que a emissão de N₂O foi mais intensa, ou seja, quando a taxa de liberação atingiu seu pico. As fontes de N apresentaram valores semelhantes para esse parâmetro (p valor >0,05). No entanto, os dados indicam que tanto a torta de mamona quanto o N-verde promoveram uma emissão mais rápida de N₂O ao longo do tempo, sugerindo uma liberação mais rápida de N presente nessas fontes, enquanto a cama de aviário mostrou uma emissão mais tardia e gradual. Em vista disso, o parâmetro mínimo assintótico corresponde o nível basal da emissão antes do aumento mais acentuado causado pela liberação de N₂O pelos fertilizantes orgânicos. A torta de mamona foi responsável pelo maior mínimo assintótico, indicando uma emissão inicial mais elevada. Portanto, os parâmetros mostram que a torta de mamoma apresenta maior potencial de emissão desse gás de efeito estufa comparado com N-verde e cama de aviário (MAGRO et al., 2021). Esse comportamento pode estar associado às características químicas das fontes de N, especialmente ao menor teor de N e à maior relação C/N observados na cama de aviário (Tabela 5). Aliado a isso, o estudo de Rosa et al. (2018) com hortaliças também demonstrou que o uso de esterco compostado resulta em menores emissões de N₂O para a atmosfera, quando comparado ao esterco cru. Isso evidencia que a compostagem gera um material mais estável, promovendo uma liberação de N mais lenta e controlada.

Os referidos fatores influenciam diretamente a velocidade de mineralização da matéria orgânica e, conseqüentemente, a maior fração de N perdida como N₂O (GUERRA et al., 2013; LASCANO et al., 2021; PIAN et al., 2023). Conforme observado por Sant'Ana et al. (2018), o

teor N e a menor relação C:N de mucuna-preta e feijão-de-porco, em comparação à crotalária e ao milho, foram os principais fatores responsáveis pela maior fração de N perdida por de N_2O , cujos parâmetros apresentaram correlação significativa com as emissões acumuladas de N_2O , com altos coeficientes de Pearson, evidenciando sua importância na mediação das perdas gasosas em fontes orgânicos ($r = -0,84$ para C:N e $r = 0,87$ para acúmulo de N; $p < 0,01$).

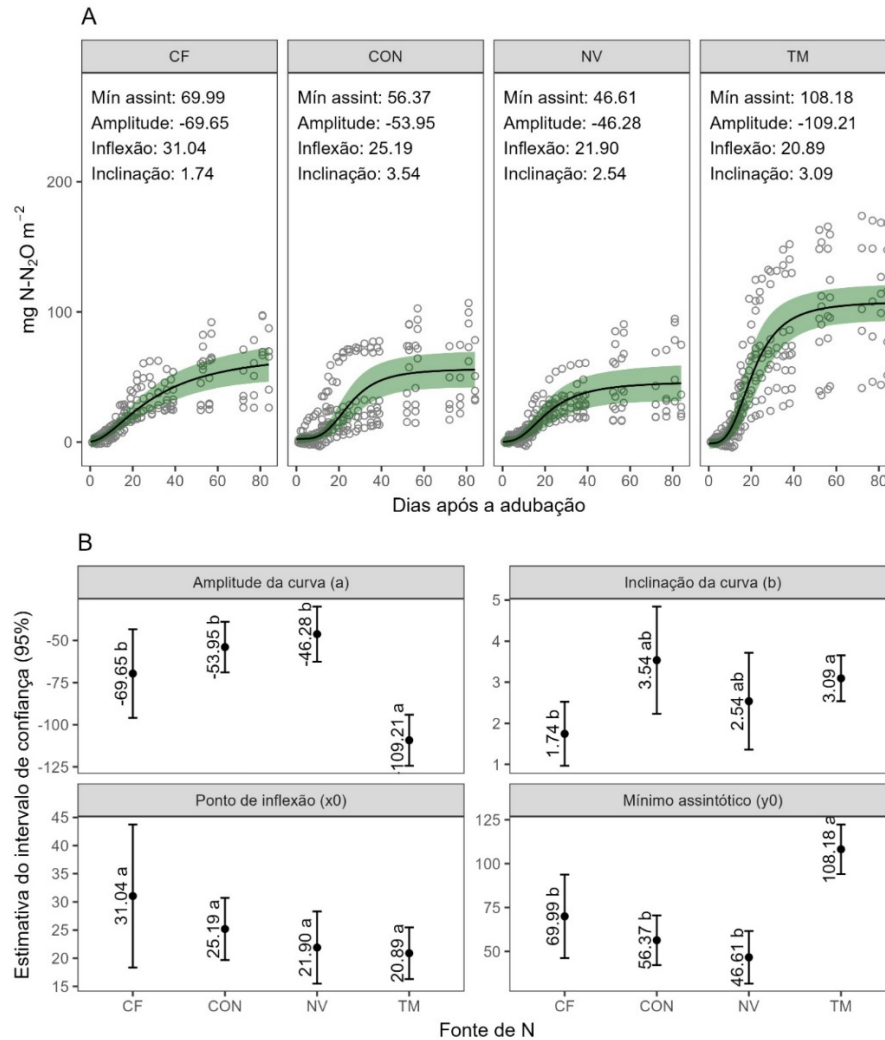


Figura 19. (A) Emissão acumulada de $N-N_2O$ ($mg\ m^{-2}$) em função dos dias após adubação de plantio com fertilizantes orgânicos na cultura da alface. Pontos representam os valores observados ($n=5$). Linha preta representa o modelo logarítmico ajustado, faixa em transparência representam as bandas de confiança a 95%. Dados transformados por log ($N-N_2O$). (B) Análise dos parâmetros dos modelos entre os tratamentos. Linhas verticais representam o intervalo de confiança a 95%. O teste de comparação de médias utilizado foi o Teste de Hipóteses Lineares Generalizadas. Diferença ao nível de significância $p < 0,05$. CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona. Fonte: elaborado pela Autora.

Os fatores de emissão de N_2O variaram entre 0,68% e -0,03% para o N-verde, 1,91% e 0,72% para a torta de mamona, e próximos de zero para a cama de aviário (Tabela 6). Esses resultados foram semelhantes aos valores observados por SANT'ANNA et al. (2018), que também observaram fatores de emissão inferiores a 1% com resíduos leguminosas em sistemas agroecológicos. No entanto, no presente estudo, fatores de emissão negativos foram observados

com N-verde e cama de aviário, o que é pouco frequente, mas já descrito por CHARLES et al. (2017). Esse comportamento pode estar relacionado à imobilização microbiana de N pelos tratamentos fertilizados com cama de aviário e N verde. Pois, a adição de matéria orgânica fresca, por meio da adubação, pode ter estimulado esse processo, no qual os microrganismos assimilam o N mineral disponível para seu crescimento, tornando-o temporariamente indisponível para reações como nitrificação e desnitrificação (BALESDENT et al., 2000; PINHEIRO et al., 2004; SILVA et al., 2024). Ainda assim, não se pode descartar que os fatores de emissão negativos sejam fruto da variabilidade experimental existente, não havendo diferenças estatísticas entre as fontes dentro dos anos e na média dos dois anos.

A emissão acumulada de amônia NH_3 ao longo de 2022 e 2023 apresentou padrões distintos entre as fontes de N (Figura 20A e 20B). Quanto ao ponto de inflexão, que corresponde ao tempo, em dias, necessário para que metade da quantidade total estimada de NH_3 seja volatilizada, não foi verificado diferença estatística. Já, a inclinação estima a taxa de transição entre o início do processo de volatilização e quando atinge a estabilidade e verifica-se que foi igual entre os tratamentos. Todavia, o parâmetro máximo da curva, que representa o ápice da emissão, foi mais elevado para a torta de mamona, o que indica uma emissão mais concentrada nos primeiros dias após a aplicação. Por outro lado, a cama de aviário e o N-verde apresentaram comportamento mais moderado, o que pode representar maior eficiência na adubação.

Os fatores de emissão da volatilização de NH_3 mais elevados foram observados na adubação com torta de mamona, atingindo 6% em 2022 e 18% em 2023. Por outro lado, o N-verde apresentou perdas reduzidas, variando de 0,86% a 3,6% (Tabela 6). A biomassa peletizada e a menor taxa de mineralização imediata do N-verde parecem favorecer menor perda de amônia (GUERRA et al., 2013). A cama de aviário, por sua vez, apresentou menor variação nestas perdas, em torno de 0,89 em 2022 e 1,6 % em 2023, bem como nas emissões de N_2O , cujo fator pode estar atribuído à sua compostagem prévia, resultando em maior estabilidade química (LIU et al., 2014). O estudo de Rocha et al. (2019), realizado na região Sudeste do Brasil, constatou que a torta de mamona causou as maiores emissões de amônia, alcançando perdas de até 40% do N aplicado durante o verão e aplicada superficialmente. Já, fontes orgânicas de resíduos de leguminosa e esterco de animais resultaram em baixas perdas de NH_3 . Esse estudo também indicou uma maior propensão da torta de mamona à volatilização de amônia quando comparada a outras fontes orgânicas.

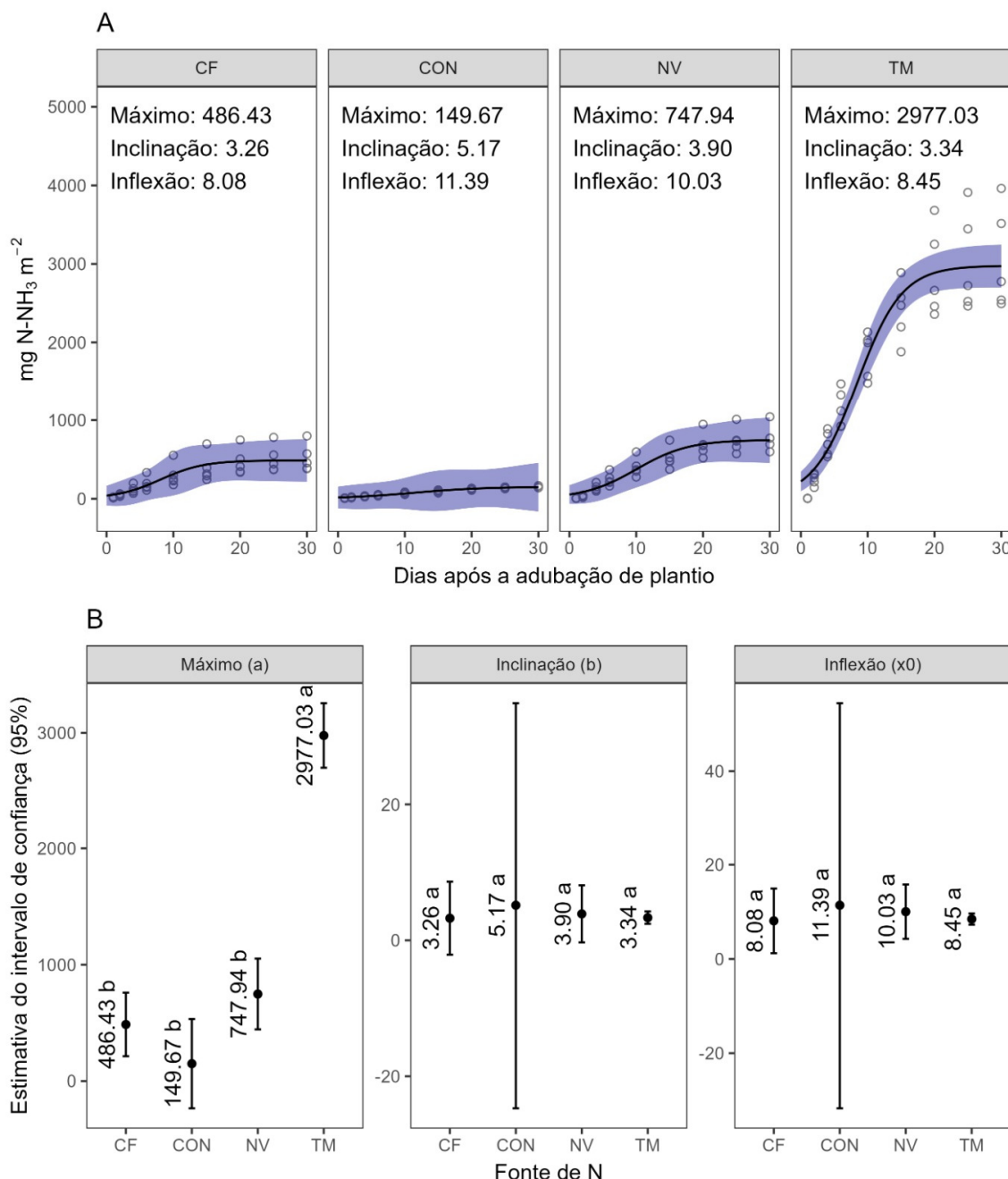


Figura 20. Emissão acumulada de N-NH₃ (mg m⁻²) em função dos dias após adubação de plantio com fertilizantes orgânicos na cultura da alface. Pontos representam os valores observados (n=5). Linha preta representa o modelo logarítmico ajustado, faixa em transparência representam as bandas de confiança a 95%. (B) Análise dos parâmetros dos modelos entre os tratamentos. Linhas verticais representam o intervalo de confiança a 95%. O teste de comparação de médias utilizado foi o Teste de Hipóteses Lineares Generalizadas. Diferença ao nível de significância $p < 0,05$. CF: Cama de aviário; CON: Controle; NV: N-verde; TM: Torta de mamona.

A análise de modelos mistos ao longo dos dois anos de avaliação evidenciou o efeito significativo do ano experimental sobre as perdas de nitrogênio (N), refletindo a influência direta das condições climáticas impostas em cada período. Sendo assim, o fator ano influenciou significativamente o fator de emissão de NH₃ e as emissões acumuladas de N₂O e NH₃ ($p < 0,05$) (Tabela 6). Assim, o modelo indica que em 2023, no segundo ano, as temperaturas

mais elevadas e a frequência baixa de precipitação (Figura 17), podem ter restringido processos de nitrificação e desnitrificação, mas intensificou a volatilização de amônia. A interação ano × fertilizante revelou efeito significativo do N-verde sobre a emissão acumulada de N_2O e, da torta de mamona sobre a emissão de NH_3 , evidenciando que a magnitude e a dinâmica de liberação de N dessas fontes dependem das condições climáticas. Para a cama de aviário, essa interação não foi significativa, indicando baixa variação frente às condições climáticas de cada na experimental.

Em síntese, os resultados deste estudo demonstram que a caracterização química dos fertilizantes e as condições climáticas exercem influência sobre as emissões de N_2O e NH_3 no solo pelas fontes orgânicas. A torta de mamona, com maior teor de N e baixa relação C/N (Tabela 6), promoveu as maiores perdas por ambas as vias, especialmente em condições de maior temperatura e umidade. Por outro lado, o N-verde e cama de aviário, apresentaram melhor desempenho ambiental comparado à torta de mamona, com menores fatores de emissão de gases. A cama de aviário compostada destacou-se pela estabilidade de seus indicadores de emissão. No entanto, embora a compostagem contribua para a estabilização do material, ela não é totalmente eficaz na eliminação de metais pesados e genes de resistência a antibióticos, o que representa um desafio ainda não superado no uso agrônomo dessa fonte (CHEN et al., 2016).

De forma geral, os resultados mostram que o uso do N verde é um insumo renovável de baixa emissão de NH_3 e N_2O , não oferece riscos de contaminação química ou biológica, sendo fundamental para entrada de matéria orgânica em solos frágeis de ambientes tropicais, e, contribui com a mitigação de gases de efeito estufa e gases poluentes.

Tabela 4. Fatores de emissão de NH₃ e N₂O a partir da aplicação de fertilizantes orgânicos na produção orgânica de alface em 2022 e 2023, na dose de 100 kg de N ha⁻¹. Seropédica, RJ, Brasil.

Fatores	Fonte de Nitrogênio (FN)	2022		2023		Valor médio dos anos de avaliação			
		Médias	EPM	Médias	EPM	Médias	EPM	Ano	FN*Ano
		p-valor				p- valor			
Fator de emissão (N ₂ O)	N verde	0,30 a	1,14	-0,10 a	0,14	0,10a	0,54	0,4243	0,6243
	Torta de mamona	1,52 a	0,87	0,63 a	0,17	1,08 a	0,44		0,2701
	Cama de aves	-0,08 a	0,16	0,10 a	0,16	0,01 a	0,11		0,8249
N ₂ O acumulado $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	N verde	30,0 a	11,4	8,6 a	2,4	19,32 ab	6,54	<0,001	0,0404
	Torta de mamona	45,5 a	15,3	28,1 a	12,0	36,84 a	8,03		0,0908
	Cama de aves	20,5 a	1,7	12,0 a	5,2	16,29 b	2,13		0,4006
	Controle	26,3 a	5,0	11,2 a	3,4	18,74 ab	3,57		0,1425
Fator de emissão (NH ₃)	N verde	0,88 b	0,12	3,63 b	0,57	2,25 b	0,53	<0,001	0,1598
	Torta de mamona	5,92 a	1,47	18,43 a	2,84	12,17 a	2,57		<0,001
	Cama de aves	1,62 ab	0,19	0,89 b	0,32	1,25 b	0,21		0,7012
NH ₃ acumulado mg N.m^{-2}	N verde	456,76 b	41,90	1091,7 b	128,7	774,25 b	123,57	<0,001	0,0869
	Torta de mamona	577,02 b	58,93	461,4 b	156,0	2.782,75 a	349,72		0,1244
	Cama de aves	2499,0 a	607,19	3616,0 a	745,8	600,33 b	93,41		0,9173
	Controle	106,51 c	10,42	194,0 c	9,3	150,12 b	16		0,8080

'Médias' correspondem à média geral das FN obtidos nos anos de 2022 e 2023, 'Ano' representa o efeito dos anos em resposta às perdas de N, enquanto a interação 'FN × Ano' indica o efeito do ano sobre as perdas de N das FN. As médias ajustadas (least-squares means) foram obtidas a partir do modelo linear, corrigindo os efeitos principais para permitir comparações balanceadas entre tratamentos.

5.6 CONCLUSÕES

O fertilizante N-verde resulta em redução de perdas N para a atmosfera, com tendência de menores emissões de N_2O , e significativamente menores de NH_3 em comparação à torta de mamona. Os resultados apontam que o N-verde, além de ser uma alternativa segura à cama de aves, pelos reduzidos riscos de contaminação biológica, é eficiente na redução de perdas de N, sendo recomendável para sistemas agrícolas de baixo insumo.

O uso estratégico da adubação orgânica representa uma prática eficaz para mitigar impactos ambientais, ao reduzir a dependência de insumos fósseis e aumentar o aporte de matéria orgânica no solo. E destaca-se como opção para avançar na sustentabilidade desses sistemas de produção.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A implantação da gliricídia mostrou-se viável, com alta produção de biomassa mesmo em condições de cultivo de sequeiro e em solos de baixa fertilidade, evidenciando seu potencial para a produção de N-verde. Para fortalecer a adoção desse sistema, recomenda-se a realização de estudos sobre o custo de produção dos bancos de biomassa, considerando tanto os investimentos iniciais de implantação quanto os custos de manutenção. Além disso, futuros trabalhos devem investigar sistemas consorciados no arranjo de plantio, no espaçamento entre as fileiras duplas, visando gerar renda adicional durante o cultivo ou contribuir para o custeio da implantação inicial.

O N-verde produzido de gliricídia apresenta vantagens agronômicas significativas, pois sua eficiência no fornecimento de N é comparável a outras fontes, porém sua utilização está associada a menores perdas de N por volatilização de amônia e à baixas emissões de óxido nitroso. No entanto, ainda é necessário ampliar o conhecimento sobre seu desempenho em diferentes condições edafoclimáticas e em culturas de ciclo longo, além de realizar estudos econômicos que viabilizem seu acesso pelos agricultores a preços acessíveis.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABISOLO. Associação Brasileira das Indústrias de Fertilizantes Orgânicos, Organominerais, Foliare, Biofertilizantes, Condicionadores de Solo e Substratos para Plantas. **Sítio da internet**. 2024. Disponível em: < <https://www.abisolo.com.br/>>. Acesso em: 3 mai. 2024.

ABOUHUSSEIN, S. Climate change and its impact on the productivity and quality of vegetable crops (review article). **Journal of Applied Sciences Research**, v. 8, p. 4359–4383, 2012.

ABOYEJI, C. M.; OLANIYAN, D. O.; DUNSIN, O.; ADEKIYA, A. O.; OKUNLOLA, F. O.; EJUE, S. W.; ADEBIYI, O. T. V.; OLOFINTOYE, T. A. J.; AREMU, C. O.; AFOLAYAN, J. O.; ADENIYI, H. A. Physiological growth, yield and quality responses of okra to sole and combined soil application of green biomass, poultry manure and inorganic fertilizers. **Plant Physiology Reports**, v. 26, n. 4, p. 709–721, 2021.

ABRANCHES, M. DE O.; SILVA, G. A. M. DA; SANTOS, L. C. DOS; PEREIRA, L. F.; FREITAS, G. B. DE. Contribuição da adubação verde nas características químicas, físicas e biológicas do solo e sua influência na nutrição de hortaliças. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e7410716351–e7410716351, 2021.

ACOSTA, J. A. DE A.; AMADO, T. J. C.; SILVA, L. S. DA; SANTI, A.; WEBER, M. A. Decomposição da fitomassa de plantas de cobertura e liberação de nitrogênio em função da quantidade de resíduos aportada ao solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 44, p. 801–809, 2014.

AGOSTINI, F.; TEI, F.; SILGRAM, M.; FARNESELLI, M.; BENINCASA, P.; ALLER, M. F. Decreasing Nitrate Leaching in Vegetable Crops with Better N Management. In: LICHTFOUSE, E. (Ed.). **Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming**. Sustainable Agriculture Reviews, vol. 4. Dordrecht: Springer, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-90-481-8741-6_6. Acesso em: 20 mar. 2025.

AGUIAR, B. G. DE; GUERRA, J. G. M.; GOULART, J. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. DA S. Agronomic efficiency of fermented composts formulated with tephrosia phytomass in arugula crop. **Horticultura Brasileira**, v. 42, p. e2624, 2024.

AGUILERA, E.; GUZMÁN, G.; ALONSO, A. Greenhouse gas emissions from conventional and organic cropping systems in Spain. II. Fruit tree orchards. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 725–737, 2015.

ALAMU, E. O.; ADESOKAN, M.; FAWOLE, S.; MAZIYA-DIXON, B.; MEHRETEAB, T.; CHIKOYE, D. *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp Applications for Enhancing Soil Fertility and Crop Nutritional Qualities: A Review. **Forests**, v. 14, n. 3, p. 635, 2023.

ALBERGONI, L.; PELAEZ, V. Da Revolução Verde à agrobiotecnologia: ruptura ou continuidade de paradigmas? **Revista de Economia**, v. 33, n. 1, 2007.

ALMEIDA, M. M. T. B. **Fertilizantes de leguminosas: autossuficiência de nitrogênio em sistemas orgânicos de produção**. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 145p, 2012.

ALMEIDA, M. M. T. B. **Fertilizantes de leguminosas: tecnologia inovadora de adubação verde para provisão de nitrogênio em sistemas orgânicos de produção.** Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 83p., 2007.

ALMEIDA, M. M. T. B.; LIXA, A. T.; SILVA, E. E. DA; AZEVEDO, P. H. S. DE; DE-POLLI, H.; RIBEIRO, R. DE L. D. Fertilizantes de leguminosas como fontes alternativas de nitrogênio para produção orgânica de alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 6, p. 675–682, 2008.

ALVES, B. J. R.; SANTOS, J. C. F.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola.** Brasília: Embrapa-SPI, p. 449-469, 1994.

ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, v. 252, n. 1, p. 1-9, 2003.

ALVES, B. J. R.; SMITH, K. A.; FLORES, R. A.; CARDOSO, A. S.; OLIVEIRA, W. R. D.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 46, p. 129-135, 2012.

ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **A degradação das pastagens como consequência do desbalanço do ciclo do nitrogênio.** Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/saude-animal/a-degradacao-das-pastagens-como-consequencia-do-desbalanco-do-ciclo-do-nitrogenio/324>. Acesso em: 21 jul. 2024.

AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMASS, E. A.; GUIRADO, N.; ROSSI, F.; MENDES, P. C. D.; MURAOKA, T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 62, p. 534–542, 2005.

ARAGÃO, A. R. de; ARAÚJO, F. de C. D.; PAIXÃO, M. S. C. P. da; OLIVEIRA, G. M. de; ALVES, R. dos S.; GUERRA, J. G. M.; ESPÍNDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. da S. **Peletização da torta de mamona para reduzir a volatilização de NH₃ e o potencial de alergenicidade.** Rio de Janeiro: Embrapa Agrobiologia, 2022. 6 p. (Folhetos biblioteca). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1147311>. Acesso em: 21 jul. 2024.

ARAUJO, E. DA S.; ARAUJO, F. DE C. D.; GONÇALVES JÚNIOR, M.; PEREIRA, B. DE C. J.; GUERRA, J. G. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; ALVES, B. J. R.; CORREIA, M. E. F. **Sistema mecanizado de produção de biomassa de gliricídia.** Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2020. 24 p. (Comunicado Técnico, 151). Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1163746/sistema-mecanizado-de-producao-de-biomassa-de-gliricidia>. Acesso em: 24 jan. 2025.

ARAÚJO, E. DA S.; GUERRA, J. G. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; MARTELLETO, L. A. P.; ALVES, B. J. R. Recuperação no sistema solo-planta de nitrogênio derivado da adubação verde aplicada à cultura do repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 729–735, 2011.

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, p. 769–776, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Estatísticas. Indicadores**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

BAGGS, E. M.; REES, R. M.; SMITH, K. A.; VINTEN, A. J. A. Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. **Soil Use and Management**, v. 16, n. 2, p. 82-87, 2000.

BAH, A. R.; RAHMAN, Z. A. Gliricidia (*Gliricidia sepium*) Green Manures as a Potential Source of N for Maize Production in the Tropics. **The Scientific World Journal**, v. 1, n. 2, p. 503-021, 2001.

BALASUBRAMANIAN, V., ALVES, B., AULAKH, M., BEKUNDA, M., CAI, Z., DRINKWATER, L., OENEMA, O. Crop, environmental, and management factors affecting nitrogen use efficiency. In: MOSIER, A. R.; SYERS, J. K.; FRENEY, J. Agriculture and the Nitrogen Cycle. **Scope**, v. 65, p. 19-33, 2004.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 3–4, p. 215–230, 2000.

BERGSTRAND, K.-J. Organic fertilizers in greenhouse production systems – a review. **Scientia Horticulturae**, v. 295, p. 110855, 2022.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. 685p.

BRASIL. **Decreto n. 10.831, de 23 de dez. de 2003**. Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências, Brasília, DF, dez 2003.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. **Ciência Rural**, v. 30, p. 365–372, 2000.

CANDIOTTO, L. Z. P. Organic products policy in Brazil. **Land Use Policy**, v. 71, p. 422–430, 2018.

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, p. 14, 2022.

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**, Viçosa, MG, v. 45, e0210017, 2021.

CASSITY-DUFFEY, K.; CABRERA, M.; GASKIN, J.; FRANKLIN, D.; KISSEL, D.; SAHA, U. Nitrogen mineralization from organic materials and fertilizers: Predicting N release. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 2, p. 522-533, 2020.

CASTRO, C. M. DE; ALVES, B. J. R.; ALMEIDA, D. L. DE; RIBEIRO, R. DE L. D. Adubação verde como fonte de nitrogênio para a cultura da berinjela em sistema orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 8, p. 779-785, 2004.

CAVALHEIRO, T. R. T.; ALCOFORADO, R. O.; SILVA, V. S. A.; COIMBRA, P. P. S.; MENDES, N. S.; CAVALCANTI, E. D. C.; JURELEVICIUS, D. A.; GONÇALVES, É. C. B. A. The Impact of Organic Fertilizer Produced with Vegetable Residues in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Cultivation and Antioxidant Activity. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 128, 2021.

CHARLES, A.; ROCHETTE, P.; WHALEN, J. K.; ANGERS, D. A.; CHANTIGNY, M. H.; BERTRAND, N. Global nitrous oxide emission factors from agricultural soils after addition of organic amendments: A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 236, p. 88-98, 2017.

CHAVES, J. DA S.; SILVA, L. S. DA; MATOS, S. M. DE; PEREIRA, H. R.; SILVA, A. F.; ALVES, R. N.; OLIVEIRA, C. P. DE. Produção de biomassa vegetal de *Gliricídia sepium* em sistema consorciado com fruteiras. **Conjecturas**, v. 22, n. 16, p. 287-298, 2022.

CHEN, B. M.; WANG, Z. H.; LI, S. X.; WANG, G. X.; SONG, H. X.; WANG, X. N. Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. **Plant Science**, v. 167, n. 3, p. 635-643, 2004.

CHEN, Z.; HU, W.; WANG, M.; WANG, L.; SU, G.; WANG, J. Synthesis and evaluation of a water-solubility glycosyl-rhodamine fluorescent probe detecting Hg^{2+} . **Carbohydrate Research, Imimosugars/Azasugars/Glycomimetics**, v. 429, p. 81-86, 2016.

CORDEIRO, A. A. S.; RODRIGUES, M. B.; GONÇALVES JÚNIOR, M.; ESPÍNDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. DA S.; GUERRA, J. G. M. Organic cabbage growth using green manure in pre-cultivation and organic top dressing fertilization. **Horticultura Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 515-520, 2018.

DA COSTA, M. B. B.; SOUZA, M.; JÚNIOR, V. M.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E. Agroecology development in Brazil between 1970 and 2015. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 41, n. 3-4, p. 276-295, 2017.

DA SILVA, E. C.; AMBROSANO, E. J.; SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; CARVALHO, A. M. Adubação verde como fonte de nutrientes às culturas. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática**. Brasília, DF: Embrapa, v. 1, p. 283, 2014.

DE ROSA, D.; ROWLINGS, D. W.; BIALA, J.; SCHEER, C.; BASSO, B.; GRACE, P. R. N_2O and CO_2 emissions following repeated application of organic and mineral N fertiliser from a vegetable crop rotation. **Science of the Total Environment**, v. 637-638, p. 813-824, 2018.

DECHEN, A. C.; NACHTIGAL, G. R. Elementos essenciais e benéficos às plantas superiores. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral das Plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2018. Cap. I. p.1119-1153.

DOBBIE, K. E.; SMITH, K. A. Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 67, n. 1, p. 37-46, 2003.

EBERLE, L.; SPERANDIO MILAN, G.; BORCHARDT, M.; MEDEIROS PEREIRA, G.; PAULA GRACIOLA, A. Determinants and moderators of organic food purchase intention. **Food Quality and Preference**, v. 100, p. 104609, 2022.

EDDIE, D. Evaluation of the effect of different plant spacing on growth, biomass accumulation and initial establishment of Moringa oleifera multi-purpose tree. **Advances in Agronomy**, v. 2, p. 31-35, 2014.

EDVAN, R. L.; CARNEIRO, M. S. D. S.; SILVA, E. B. D.; ALBUQUERQUE, D. R.; PEREIRA, E. S.; BEZERRA, L. R.; SILVA, A. L. D.; ARAÚJO, M. J. D. Análise de crescimento da gliricídia submetida a diferentes manejos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v. 65, n. 250, p. 163-169, 2016.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Rio de Janeiro, 575p, 2017.

EMBRAPA. **Manual de Laboratórios: Solo, Água, Nutrição Vegetal, Nutrição Animal e Alimentos**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 313p.

ESTEVES, R. C.; DO AMARAL VENDRAMINI, A. L.; ACCIOLY, F. A qualitative meta-synthesis study of the convergence between organic crop regulations in the United States, Brazil, and Europe. **Trends in Food Science & Technology**, v. 107, p. 343-357, 2021.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 6-16, 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. Em: **Advances in Agronomy**. Academic Press, 2005. v. 88p. 97-185.

FAO. Food and Agriculture Organization. **Agroecology and the Sustainable Development Goals (SDGs)**. Disponível em: <https://www.fao.org/agroecology/overview/agroecology-and-the-sustainable-development-goals/en>. Acesso em: 19 abr. 2024.

FARIA DE ABREU CAMPOS, R.; DOMINGUES, É. P.; SOUZA MAGALHÃES, A.; MARQUES DO PRADO TANURE, T. The economic impacts of the rural credit: An analysis of the Brazilian National Family Farming Strengthening Program by biome. **Regional Science Policy & Practice**, v. 16, n. 10, p. 100115, 2024.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2013. 421 p.

FIGURE, C.; CERETTA, C. A.; GIACOMINI, S. J.; TRENTIN, G.; LORENSINI, F. Liberação do N em solos de diferentes texturas com ou sem adubos orgânicos. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1187–1192, 2012.

FRANZ, M. R.; LOPES, C. L.; ANDRADE, E. A. DE; JÚNIOR, L. A. Z. Composição química de cama de aviário condicionada com gesso agrícola ou cal virgem. **Acta Iguazu**, v. 9, n. 4, p. 24-32. 2020.

FROELICH, A. G.; MELO, A. S. S. A.; SAMPAIO, B. Comparing the Profitability of Organic and Conventional Production in Family Farming: Empirical Evidence From Brazil. **Ecological Economics**, v. 150, p. 307-314, 2018.

GALHARDO, L. R.; SILVA, L. F. S. DA; LIMA, Â. S. F. Produtores orgânicos no Brasil e seus organismos certificadores. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 37-45, 2018.

GENG, Y.; WANG, J.; SUN, Z.; JI, C.; HUANG, M.; ZHANG, Y.; XU, P.; LI, S.; PAWLETT, M.; ZOU, J. Soil N₂O emissions decrease from intensive greenhouse vegetable fields by substituting synthetic N fertilizer with organic and bio-organic fertilizers. **Geoderma**, v. 383, p. 114730, 2021.

GOLDBERG, S. D.; GEBAUER, G. Drought turns a Central European Norway spruce forest soil from an N₂O source to a transient N₂O sink. *Global Change Biology*, v. 15, n. 4, p. 850–860, 2009.

GONÇALVES JÚNIOR, M. **Manejo de Poda de *Gliricidia sepium* e Utilização do Resíduo como Cobertura Morta no Cultivo de Hortaliças em Sistema Orgânico**. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 145p, 2017.

GOULART, J. M. **Estratégias de produção in situ de biomassa de leguminosas arbustivas e arbórea para a confecção de compostos fermentados empregados na fertilização de cenoura e alface consorciadas em cultivo orgânico**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Instituto de Agronomia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 83p, 2020.

GOULART, J. M.; GUERRA, J. G. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. DA S.; ROUWS, J. R. Shrub legume green manure intercropped with maize preceding organic snap bean cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 39, n. 3, p. 319-323. 2021.

HENTZ, P.; DE CARVALHO, N. L. Impactos ambientais da fertilização orgânica em sistemas agropecuários na região sul-brasileira. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas**. v. 18, n. 1, p. 13, 2014.

HENZ, G. P. **Produção orgânica de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças, 2007.

HONG, J.; XU, F.; CHEN, G.; HUANG, X.; WANG, S.; DU, L.; DING, G. Evaluation of the Effects of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Applications on the Growth, Yield, and Quality of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). **Agronomy**, v. 12, p. 2477, 2022.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Annals...** Cambridge University Press, Cambridge and New York. 2013.

JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 46, p. 129-135, 2012.

KARIM, A. B.; SAVILL, P. S. Effect of spacing on growth and biomass production of *Gliricidia sepium* (jacq) walp in an alley cropping system in Sierra Leone. **Agroforestry Systems**, v. 16, n. 3, p. 213-222, 1991.

KEMPERS, A. J.; ZWEERS, A. Ammonium determination in soil extracts by the salicylate method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, n. 7, p. 715-723, 1986.

KHALIL, K.; MARY, B.; RENAULT, P. Nitrous oxide production by nitrification and denitrification in soil aggregates as affected by O₂ concentration. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 4, p. 687-699, 1 abr. 2004.

LAZICKI, P.; GEISSELER, D.; LLOYD, M. Nitrogen mineralization from organic amendments is variable but predictable. **Journal of Environmental Quality**, v. 49, n. 2, p. 483-495, 2020.

LEAL, M. A. DE A.; BALIEIRO, F. DE C.; INÁCIO, C. T.; CAMPOS, D. V. B. DE; GUERRA, J. G. M.; ZONTA, E.; FREIRE, L. R. Uso e manejo da matéria orgânica para fins de fertilidade do solo. In: FREIRE, L. R. (Ed.). **Manual de calagem e adubação do estado do Rio de Janeiro**. Seropédica - RJ: Universidade Rural e Embrapa, 2013. p. 143-160.

LI, S.-X.; WANG, Z.-H.; STEWART, B. A. Responses of Crop Plants to Ammonium and Nitrate N. **Advances in Agronomy**. v. 118p. 205-397, 2013.

LI, T.; ZHANG, Y.; BEI, S.; LI, X.; REINSCH, S.; ZHANG, H.; ZHANG, J. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates. **CATENA**, v. 194, p. 104739, 2020.

LIU, C. W.; SUNG, Y.; CHEN, B. C.; LAI, H. Y. Effects of Nitrogen Fertilizers on the Growth and Nitrate Content of Lettuce (*Lactuca sativa* L.). **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 11, n. 4, p. 4427-4440, 2014.

LIU, N.; ZHOU, J.; HAN, L.; MA, S.; SUN, X.; HUANG, G. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. **Bioresource Technology**, v. 241, p. 190-199, 2017.

LOURENÇO, K. S.; ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; MONTEZANO, Z. F.; SOARES, J. R.; SOUSA, R. DE M.; CARMO, J. B. DO; KURAMAE, E. E.; CANTARELLA, H. Strategies to mitigate the nitrous oxide emissions from nitrogen fertilizer applied with organic fertilizers in sugarcane. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 1476-1486, 2019.

MAFONGOYA, P. L.; BARAK, P.; REED, J. D. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization of tree leaves and manure. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 4, p. 298–305, 2000.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Em 7 anos, triplica o número de produtores orgânicos cadastrados no ministério**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/em-sete-anos-triplica-o-numero-de-produtores-organicos-cadastrados-no-mapa>. Acesso em: 16 mai. 2024.

MATA, M. G. F. **Qualidade do solo e avaliação microeconômica de um módulo experimental de produção orgânica intensiva de hortaliças**. 2012. 75f. Dissertação-Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2012.

MATOS, B. C. **Análise prospectiva ex-ante da tecnologia de fertilizante orgânico obtido a partir da biomassa de plantas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2022.

MBAH, C. N.; MBAH, E. C.; ORJI, J. E.; IGBERI, C.; ABAM, P.; AWERE, S. U. Using *Gliricidia sepium* prunings as green manure in a degraded ultisol; effects on soil physical properties and yield of okra (*Abelmoschus esculentus*) in Abakaliki, southeast Nigeria. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 40, n. 4, p. 257–266, out. 2024.

MCKAY, B.; NEHRING, R. Sustainable Agriculture: An Assessment of Brazil's Family Farm Programmes in Scaling Up Agroecological Food Production. Brasília-DF, Brazil. **International Policy Centre for Inclusive Growth**. p.1-10, 2014.

MELLO, G. A. B. DE; CORREIA, E. F.; GUERRA, J. G. M.; SOUZA, E. F. F. DA S.; PAIXÃO, M. S. C. P. DA; ARAUJO, E. DA S. Avaliação da biodisponibilidade de nitrogênio contido em diferentes protótipos de fertilizante orgânico N-verde. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

MONDAL, B.; BERA, M.; DAS, S. K. Castor bean cake: A paradox of toxicity and nutrient source in farm animals and aquaculture. **Indian Journal of Animal Health**, v. 58, n. 02, p. 157, 2019.

MOTASIM, A. M.; SAMSURI, A. W.; NABAYI, A.; AKTER, A.; HAQUE, M. A.; SUKOR, A. S. A.; ADIBAH, A. M. Urea application in soil: processes, losses, and alternatives - a review. **Discover Agriculture**, v. 2(1), p. 42, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00060-z>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MOURA, Á. Q.; CORRÊA, E. B.; FERNANDES, J. D.; FILHO, A. F. M.; LEÃO, A. C.; BOAVA, L. P. Eficiência agrônômica da alface submetida a diferentes compostos orgânicos. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 10, n. 1, p. 155-163, 2020.

MOURA, I. F. D.; GUEDES, C. A. M.; ASSIS, R. L. D. Agroecology in the Brazilian government agenda: developments between 2011 and 2014. **Cuadernos de Desarrollo Rural = International Journal of Rural Development**, v. 14, n. 79, p. 1-15, 2017.

MUELLER, T.; THORUP-KRISTENSEN, K. N-Fixation of Selected Green Manure Plants in an Organic Crop Rotation. **Biological Agriculture & Horticulture**, v. 18, n. 4, p. 345-363, 1 jan. 2001.

MUSYOKA, M. W.; ADAMTEY, N.; MURIUKI, A. W.; CADISCH, G. Effect of organic and conventional farming systems on nitrogen use efficiency of potato, maize and vegetables in the Central highlands of Kenya. **European Journal of Agronomy**, v. 86, p. 24-36, 2017.

MYHRE, G.; MYHRE, C. L.; SAMSET, B. H.; STORELVMO, T. Aerosols and their relation to global climate and climate sensitivity. **Nature Education Knowledge**, v. 4, n. 5, p. 7, 2013.

OLIVEIRA, A. S. DE; SILVA, M. A. R.; BOAS, L. H. DE B. V.; BORGES, R. C.; MEDEIROS, F. DE A. DA S.; NACIF, L. O. Comportamento do consumidor de alimentos orgânicos baseado nas relações entre atributos-consequências-valores. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 6, p. e38411629173–e38411629173, 2022.

OLSEN, K. K. Multiple Wavelength Ultraviolet Determinations of Nitrate Concentration, Method Comparisons from the Preakness Brook Monitoring Project, October 2005 to October 2006. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 187, n. 1, p. 195-202, 2008.

PAN, B. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283-289, 2016.

PAULA, P. D. DE; CAMPELLO, E. F. C.; GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. DE A.; RESENDE, A. S. DE. Decomposição das podas das leguminosas arbóreas *Gliricidia sepium* E *Acacia angustissima* em um sistema agroflorestal. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 791-800, 2015.

PAULINO, G. M.; ALVES, B. J. R.; BARROSO, D. G.; URQUIAGA, S.; ESPINDOLA, J. A. A. Fixação biológica e transferência de nitrogênio por leguminosas em pomar orgânico de mangaueira e gravioleira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1598-1607, 2009.

PEDRILHO, G. M.; FERNANDES, J. V. D. S.; DA COSTA, A. R.; MANNIGEL, A. R.; FELIPE, D. F.; BIDO, G. D. S.; ANDREOLA, R.; REZENDE, R.; DE FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A. Nitrogen Fertigation in Lettuce Culture. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 1, p. 126, 2020.

PEDRILHO, G. M.; FERNANDES, J. V. S.; COSTA, A. R.; MANNIGEL, A. R.; FELIPE, D. F.; BIDO, G. S.; ANDREOLA, R.; REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C. A. **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, p. 126-137, 2020.

PIAN, L. B.; GUERRA, J. G. M.; BERBARA, R. L. L.; JESUS, M. S. C. DE; BARBOSA JUNIOR, J.; ARAÚJO, E. DA S. Characterization, nitrogen availability, and agronomic efficiency of fermented composts in organic vegetable production. **Organic Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 461-481, 2023.

PICOTTE, J. J.; RHODE, J. M.; CRUZAN, M. B. Leaf morphological responses to variation in water availability for plants in the Piriqueta caroliniana complex. **Plant Ecology**, v. 200, n. 2, p. 267-275, 2009.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 77, n. 1, p. 79-84, 2004.

R CORE TEAM. **R: O Projeto R para Computação Estatística**. 2025. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: em 29 de jan. 2025.

REZENDE, A. L. P. S. **Desenvolvimento e avaliação agronômica de um fertilizante formulado com a biomassa de gliricídia**. 116p. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023.

ROCHA, A. A.; ARAÚJO, E. DA S.; SANTOS, S. DA S.; GOULART, J. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; GUERRA, J. G. M.; ALVES, B. J. R.; ROUWS, J. R. C. Ammonia Volatilization from Soil-Applied Organic Fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019.

RONDON, E. V. Estudo de biomassa de *Tectona grandis* L.f. sob diferentes espaçamentos no Estado de Mato Grosso. **Revista Árvore**, v. 30, p. 337-341, jun. 2006.

SALLES, F. K. L. **Produção de frutos e qualidade fisiológica de sementes de tomate em função do espaçamento e posição do cacho floral sob sistema orgânico em Seropédica, RJ**. 68p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

SAMBUICHI, R. H. R.; MOURA, I. F. DE; MATTOS, L. M; ÁVILA, M. L. DE; ESPÍNOLA, P. A. C.; SILVA, A. P. M. DA (Orgs.). **A Política nacional de agroecologia e produção orgânica no Brasil: uma trajetória de luta pelo desenvolvimento rural sustentável**. Brasília: IPEA. 2017. 463 p.

SANTOS CORDEIRO, A. A. DOS; SOUSA ANTUNES, L. F. DE; COSTA RODRIGUES DOS SANTOS, G. DA; GUERRA, J. G. M.; BERBARA, R. L. L.; SILVA ARAÚJO, E. DA; ESPINDOLA, J. A. A. Agronomic potential of different fermented organic composts based on agro-industrial plant waste. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 9, p. 863, 2024.

SANTOS, A. F. DOS; MENEZES, R. S. C.; FRAGA, V. S.; PÉREZ-MARIN, A. M. Efeito residual da adubação orgânica sobre a produtividade de milho em sistema agroflorestal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1267-1272, 2010.

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**. Brasília, DF: Embrapa, 450p, 2018.

SANTOS, L.; BIDARRA, Z.; SCHMIDT, C.; STADUTO, J. Políticas públicas para o comércio de produtos orgânicos no Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 2, p. 447-459, 2017.

SANTOS, L.; WRIGHT, A. L.; LUO, Y.; LU, H.; ODERO, D. C. Nitrogen Cycling and Management for Romaine and Crisphead Lettuce Grown on Organic Soils: SL386/SS588, 9/2013. **EDIS**, v. 2013, n. 8, 2013.

SANTOS, R. H. S.; SILVA, F. D.; CASALI, V. W. D.; CONDE, A. R. Efeito residual da adubação com composto orgânico sobre o crescimento e produção de alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 11, p. 1395-1398, 2001.

SANTOS, S. S. **Desenvolvimento e Avaliação Agronômica de Protótipos de Fertilizantes Vegetais Obtidos a Partir da Biomassa Processada de *Gliricidia sepium***. 85p. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.

SEDIYAMA, M. A. N.; SANTOS, I. C. DOS; LIMA, P. C. DE. Cultivo de hortaliças no sistema orgânico. **Revista Ceres**, v. 61, n. suppl, p. 829-837, 2014.

SEVERINO, L.; JOSÉ, M.; TAVARES, V.; JOSEMAR, J.; NASCIMENTO, V.; FERREIRA, G.; SOFIATTI, V. **Toxidez Causada pelo Excesso de Torta de Mamona como Fertilizante Orgânico**. Embrapa Algodão. 20p, 2007.

SHCHERBAK, I.; ROBERTSON, G. P. Nitrous Oxide (N₂O) Emissions from Subsurface Soils of Agricultural Ecosystems. **Ecosystems**, v. 22, n. 7, p. 1650-1663, 2019.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 322-338, 2013.

SILVA, Á. T. DA; SILVA, S. T. DA. Panorama da agricultura orgânica no Brasil. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 23, p. 1031-1040, 2016.

SILVA, C. S. R. DE A. DA; SCHULTZ, N.; SIQUINI, R. S.; PERRUT, J. E.; ALVES, B. J. R.; ARAÚJO, E. DA S. Expansão da agricultura orgânica nos aspectos socioeconômicos: um breve panorama nacional. In: PEREIRA, M. G. **Como a ciência do solo está contribuindo para atingir os objetivos do desenvolvimento sustentável na América Latina e Europa?** Seropédica – RJ. v. 1p. 1-7. 2024b.

SILVA, C. S. R. A. **Qualidade do solo de um sistema de plantio direto de hortaliças, sob produção orgânica em Seropédica (RJ)**. 64p. Tese (Doutorado em Agronomia- Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2020.

SILVA, C. S. R. DE A. DA; SILVA, S.R.A; ARAÚJO, E.; PINHEIRO, É. F.M.; SILVA, M. A mini review on changes in soil attributes by management practices in organic vegetable production in Southeast Brazil. **International Journal of Horticulture**, v. 5, p. 7, 2021.

SILVA, J. H. C. S.; BARBOSA, A. DA S.; GOMES, D. DA S.; AQUINO, I. DE S.; SILVA, J. R. DA. Dynamics of plant organic matter decomposition in different agricultural landscapes. **Revista Caatinga**, v. 36, p. 135-144, 2023.

SILVA, C. S. R. DE A. DA; SILVA ARAÚJO, E. DA; COSTA, L. S.; ARAÚJO, S. N. DE; SILVA JUNIOR, J. B. DA; ZIVIANI, M. M.; SILVA, M. S. R. DE A. DA; GUERRA, J. G. M.; ESPINDOLA, J. A. A.; PINHEIRO, É. F. M. No-till system organic vegetable production under green manure: effect on yield and soil properties. **Organic Agriculture**. v.1, p-1-13, 2024a.

SILVA, C. S. R. DE A.; JÚNIOR, J. B. S.; REZENDE, A. L. P. DE S.; SILVA, M. S. R. DE A.; ARAUJO, E. DA S.; ALVES, B. J. R. Adubação residual de fertilizantes orgânicos na produção agroecológica de alface. **Cadernos de Agroecologia**, v. 19, n. 1, 2024.

SILVA, F. A. D. M.; VILLAS BOAS, R. L.; SILVA, R. B. Resposta da alface à adubação nitrogenada com diferentes compostos orgânicos em dois ciclos sucessivos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 131-137, 2010.

SILVA, L. V. B. D.; LIMA, V. L. A. DE; SILVA, V. N. B.; SOFIATTI, V.; PEREIRA, T. L. P. Torta de mamona residual e irrigação com efluente sobre crescimento e produção de algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1264-1270, 2013.

SILVA, P. N.; LANNA, N. B.; CARDOSO, A. I. Produção de beterraba em função de doses de torta de mamona em cobertura. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 3, p. 416-421, 2016.

SILVA, S. DE D. DA; PRESOTTO, R. A.; MAROTA, H. B.; ZONTA, E. Uso de torta de mamona como fertilizante orgânico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 19-27, 2012.

SKINNER, C.; GATTINGER, A.; MULLER, A.; MÄDER, P.; FLIEBBACH, A.; STOLZE, M.; RUSER, R.; NIGGLI, U. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management — A global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 468-469, p. 553-563, 2014.

SOUZA JUNIOR, J. B. DE; GUERRA, J. G. M.; GOULART, J. M.; SILVA, L. O. DA; ESPINDOLA, J. A. A.; ARAÚJO, E. DA S. Agronomic efficiency of fermented composts in organic fertilization management of butterhead lettuce and green leaf lettuce. **Horticultura Brasileira**, v. 41, p. e2609, 2023.

SOUZA, R. F. DE; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.

SOUZA, R. F. DE; FIGUEIREDO, C. C. DE; MADEIRA, N. R.; ALCÂNTARA, F. A. DE. Effect of management systems and cover crops on organic matter dynamics of soil under vegetables. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 923-933, 2014.

ŚREDNICKA-TOBER, D.; OBIEDZIŃSKA, A.; KAZIMIERCZAK, R.; REMBIAŁKOWSKA, E. Environmental impact of organic vs. conventional agriculture - a review. **Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering**, n. Vol. 61, nr 4, p. 204-211, 2016.

STAFANATO, J. B.; GOULART, R. DE S.; ZONTA, E.; LIMA, E.; MAZUR, N.; PEREIRA, C. G.; SOUZA, H. N. DE. Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 726-732, 2013.

STECKEL, M.; MOSER, W. K.; RÍO, M. DEL; PRETZSCH, H. Implications of Reduced Stand Density on Tree Growth and Drought Susceptibility: A Study of Three Species under Varying Climate. **Forests**, v. 11, n. 6, p. 627, 2020.

SYLVESTRE, T. B.; BRAOS, L. B.; BATISTELLA FILHO, F.; DA CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E. Mineral nitrogen fertilization effects on lettuce crop yield and nitrogen leaching. **Scientia Horticulturae**, v. 255, p. 153-160, 2019.

THORUP-KRISTENSEN, K. Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot. **Acta Horticulturae**, v. 563, p. 201-206, 2001.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. 2007. 718p.

VALENZUELA, H. Ecological Management of the Nitrogen Cycle in Organic Farms. **Nitrogen**, v. 4, n. 1, p. 58-84, 2023.

VANLAUWE, B.; KIHARA, J.; CHIVENGE, P. Agronomic use efficiency of N fertilizer in maize-based systems in sub-Saharan Africa within the context of integrated soil fertility management. **Plant and Soil**, v. 339, p. 35-50, 2011.

VERA, D. E.; LAURA, V. A.; FERREIRA, A. D.; COUTO, A. M. Crescimento e forma do eucalipto em função da densidade de plantio. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 504-522, 2022.

VIEIRA FILHO, J. S. M.; GUERRA, J. G. M.; GOULART, J. M.; ARAÚJO, E. DA S.; ESPINDOLA, J. A. A.; ROUWS, J. R. Management of green manure and organic fertilization with fermented compost fertilizer in agroecological cultivation of American broccoli. **Horticultura Brasileira**, v. 41, p. e2599, 2023.

VILELA, G.; MANGABEIRA, J. D. C.; MAGALHÃES, L.; TOSTO, S. **Agricultura orgânica no Brasil: um estudo sobre o Cadastro Nacional de Produtores Orgânicos**. Embrapa Territorial-Documentos (INFOTECA-E), 2019.

VOGT, C. DE M.; ALENCAR, D. A.; FOCHEZATTO, A. The economic impact of organic production in Brazil: A study based on municipal production hotspots. **PLOS ONE**, v. 17, n. 3, p. e0264095, 2022.

WALPOLA, B.; ARUNAKUMARA, K. K. I. U. Decomposition of Gliricidia leaves: The effect of particle size of leaves and soil texture on carbon mineralization. **Journal of Tropical Agriculture Research and Extension**, v. 13, p. 19-23, 2010.

WANG, Q.; WEN, J.; WEN, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, N.; WANG, Y.; BAI, L.; SU, S.; ZENG, X. Alteration of soil-surface electrochemical properties by organic fertilization to reduce dissolved inorganic nitrogen leaching in paddy fields. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104956, 2021.

WESTER-LARSEN, L.; MÜLLER-STÖVER, D. S.; SALO, T.; JENSEN, L. S. Potential ammonia volatilization from 39 different novel biobased fertilizers on the European market – A laboratory study using 5 European soils. **Journal of Environmental Management**, v. 323, p. 116249, 2022.

WILLER, H. SCHLATTER, B. Czech Organic. **The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2023**. FiBL & IFOAM – Organics International (2023): The World of Organic Agriculture, p. 1-359, 2023.

WUTKE, E. B.; CALEGARI, A.; WILDNER, L. P.; AMBROSANO, E. J.; ESTEVES, J. A. F. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para uso. In: LIMA FILHO, O. F.; AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (Eds.) **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: Fundamentos e prática**. Brasília, DF: Embrapa, v. 1 (2ª edição), p. 55-173, 2023.

XU, R.; TIAN, H.; PAN, S.; PRIOR, S. A.; FENG, Y.; BATCHELOR, W. D.; CHEN, J.; YANG, J. Global ammonia emissions from synthetic nitrogen fertilizer applications in agricultural systems: Empirical and process-based estimates and uncertainty. **Global Change Biology**, v. 25, n. 1, p. 314-326, 2019.

ZAHARAH, A.; BAH, A. Patterns of decomposition and nutrient release by fresh *Gliricidia* (*Gliricidia sepium*) leaves in an ultisol. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 55, p. 269-277, 1999.

ZANDVAKILI, O. R.; BARKER, A. V.; HASHEMI, M.; AUTIO, W. R.; ETEMADI, F.; SADEGHPOUR, A. Influence of nitrogen source and rate on lettuce yield and quality. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 1401-1414, 2022.

ZANDVAKILI, O. R.; BARKER, A. V.; HASHEMI, M.; ETEMADI, F. Biomass and nutrient concentration of lettuce grown with organic fertilizers. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 5, p. 444-457, 2019.

ZHANG, M.; YAO, Y.; TIAN, Y.; CENG, K.; ZHAO, MENG; ZHAO, MIAO; YIN, B. Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems. **Field Crops Research**, v. 227, p. 102-109, 2018.

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. **Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília: Embrapa, p. 263-303, 2021.