



**ALINE DOS SANTOS ZAQUEU**

**BLENDS DE FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO  
CONTROLADA E UREIA COM INIBIDORES DE UREASE  
PARA CAFEICULTURA**

**LAVRAS – MG**

**2024**

**ALINE DOS SANTOS ZAQUEU**

**BLENDS DE FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E UREIA COM  
INIBIDORES DE UREASE PARA CAFEICULTURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2024**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração  
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com  
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Zaqueu, Aline.

Blends de fertilizantes de liberação controlada e ureia com inibidores de urease  
para cafeicultura / Aline Zaqueu. - 2024.

92 p.

Orientador: Douglas Ramos Guelfi Silva

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.  
Bibliografia.

1. Volatilização de amônia. 2. Óxido nitroso. 3. Nitrogênio. 4. Fertilizantes. 5. Café.  
I. Silva, Douglas Ramos Guelfi. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

**ALINE DOS SANTOS ZAQUEU**

**BLENDS DE FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E UREIA COM  
INHIBIDORES DE UREASE PARA CAFEICULTURA**

**CONTROLLED-RELEASE FERTILIZER BLENDS AND UREA WITH UREASE  
INHIBITORS FOR COFFEE CULTIVATION**

APROVADA em 29 de outubro de 2024.

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva – UFLA

Dr. José Laércio Favarin – USP

Dra. Herminia Emilia Prieto Martinez - UFV

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2024**

*O esforço é uma escolha!*

*Aos meus pais e minha irmã, que me incentivaram a crescer, a ir em busca dos meus sonhos e a lutar pela minha realização pessoal, essa conquista é nossa!*

*A vocês, dedico essa vitória!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me permitir conquistar todos os objetivos que foram previamente desenhados por Ele, livrando-me dos perigos e iluminando meus caminhos.

Aos meus pais, Mauri e Nilza, e à minha irmã, Karina, por sonharem comigo, me incentivarem e compreenderem as dificuldades de estar longe de casa e da família, me apoiando e tornando minha jornada mais leve e prazerosa. Aos meus avós Maria Aparecida, Benedito e Sebastião (*in memoriam*) e Ana Vitória, por serem os maiores exemplos de força e superação que levarei por toda minha vida, e à minha família, por todo carinho, cuidado, orações, sorrisos e pela torcida para a realização deste sonho.

Ao meu namorado, Eduardo, por ser meu abrigo e estar presente nesta jornada todos os dias, garantindo que eu não me esquecesse em nenhum momento, mesmo nos mais difíceis, da minha capacidade de alcançar mais esta conquista. A todos os meus amigos e amigas que sempre celebram as conquistas e torcem pelo meu sucesso, compartilhando sorrisos, lembranças e boas histórias vividas ao longo destes anos.

Ao meu orientador, Douglas Guelfi, por acreditar em mim e fornecer todo o apoio necessário para a condução deste projeto. Ao nosso laboratorista e grande amigo, Sr. Humberto, por toda dedicação e apoio na condução das análises e pela amizade que construímos ao longo desse período de convivência. Ao departamento de Ciência do Solo, à Universidade Federal de Lavras, professores, técnicos, auxiliares, pós graduandos e IC's, os quais foram indispensáveis para condução dos trabalhos, partilha de conhecimentos e ombro amigo nos momentos em que mais precisei. Aos membros desta banca de defesa, por todas as contribuições e por dedicarem seu tempo para enriquecer este trabalho.

A todos os profissionais da Fazenda Samambaia, por cederem espaço para condução da pesquisa e por darem todo o suporte necessário para garantir que tudo fluísse da melhor maneira possível!

À empresa Rehagro e aos amigos do trabalho, por me incentivarem e me permitirem conciliar meus objetivos, acreditando no meu potencial.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Muito obrigada a cada um de vocês que contribuiu para a realização deste sonho!

## RESUMO

A adoção de tecnologias para fertilizantes nitrogenados reduz perdas de nitrogênio (N) e garante maior eficiência agrônômica em lavouras cafeeiras. Nesse sentido, o objetivo do estudo foi avaliar tecnologias para fertilizantes nitrogenados na espécie *Coffea arabica* L., aplicadas em diferentes doses de N e observar seus efeitos na dinâmica do N no sistema solo-planta-atmosfera. O experimento foi realizado no município de Santo Antônio do Amparo – MG, nas safras 22/23 e 23/24. O delineamento foi em blocos casualizados, com três repetições e quatro fontes de N: ureia convencional, fertilizante organomineral e dois blends. Os tratamentos foram aplicados nas doses de 200, 280 e 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A ureia convencional foi parcelada em três aplicações e os demais, aplicados em dose única. Foram avaliadas as perdas por volatilização de amônia (N-NH<sub>3</sub>), emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), avaliação da liberação de nitrogênio em condições de campo e laboratório, teores foliares de N, produtividade, rendimento e exportação de N pelos grãos e cascas. Para o teste de liberação de N em laboratório, o organomineral havia liberado 97% de N já aos 7 dias após o início do experimento. Aos 196 dias o blend 1 alcançou uma taxa de liberação de 73% de N e o blend 2, de 84% do N aplicado. Para os testes conduzidos em campo, foram obtidos os seguintes resultados: liberação de 95% e 72% do N aos 257 dias pelos blends 2 e 1, na safra 22/23; liberação de 94% e 72% aos 196 dias pelos blends 2 e 1 na safra 23/24. As perdas acumuladas por volatilização de amônia foram influenciadas pelas tecnologias na seguinte ordem decrescente, considerando-se o biênio: ureia (99,1 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) > organomineral (68,5 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) > blend 1 (44,2 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) = blend 2 (42,8 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). As perdas por volatilização de amônia reduziram-se em relação às da ureia, com valores 40,49% menores para o fertilizante organomineral, 71,17% menores para o blend 1 e 71,34% menores para o blend 2 na safra 22/23. Já na segunda safra (23/24), a redução de perdas foi de 19,61%, 36,91% e 39,75% para organomineral, blend 1 e blend 2, respectivamente. O tratamento controle resultou em maiores fluxos de emissão de N<sub>2</sub>O (1405,8 g ha<sup>-1</sup>) dentre os fertilizantes utilizados, o que sugere que, nas condições do experimento, o solo não fertilizado contribuiu de maneira mais expressiva para perdas de N em forma de N<sub>2</sub>O em comparação aos fertilizantes testados. Os teores foliares de N observados encontram-se dentro da faixa adequada (25 a 30 g de N kg<sup>-1</sup>). A produtividade e o rendimento não foram influenciados pelas tecnologias e doses utilizadas, apresentando valores médios, respectivamente, de 2618,5 kg ha<sup>-1</sup> (43,6 sacas ha<sup>-1</sup>) e 473,4 litros de café colhido para compor uma saca de 60 kg. A exportação total, considerando-se grãos e cascas, foi em média, de 102,6 kg ha<sup>-1</sup> de N.

**Palavras-chave:** café; fertilizantes nitrogenados; liberação controlada; volatilização de amônia; nitrogênio; adubação; óxido nitroso.

## ABSTRACT

Adopting technologies for nitrogen fertilizers reduces nitrogen (N) losses and ensures greater agronomic efficiency in coffee plantations. In this context, the objective of this study was to evaluate technologies for nitrogen fertilizers in the *Coffea arabica* L., applied at different N rates, and to observe their effects on N dynamics within the soil-plant-atmosphere system. The experiment was conducted in the municipality of Santo Antônio do Amparo – MG, during the 2022/2023 and 2023/2024 growing seasons. The experimental design was a randomized block design with three replications and four N sources: conventional urea, organomineral fertilizer, and two blends. Treatments were applied at rates of 200, 280, and 400 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. Conventional urea was split into three applications, while the other fertilizers were applied in a single dose. The evaluated parameters included ammonia volatilization losses (N-NH<sub>3</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions, nitrogen release assessment under field and laboratory conditions, leaf N content, yield, efficiency, and N export via grains and husks. For the laboratory nitrogen release test, the organomineral fertilizer released 97% of its N within seven days of the experiment's start. By day 196, blend 1 reached a release rate of 73%, while blend 2 released 84% of the applied N. In the field trials, the following results were obtained: by day 257, blend 2 and blend 1 had released 95% and 72% of their N, respectively, in the 2022/2023 season; by day 196, blend 2 and blend 1 had released 94% and 72% of their N, respectively, in the 2023/2024 season. Cumulative ammonia volatilization losses were influenced by the technologies in the following decreasing order over the two-year period: urea (99.1 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) > organomineral (68.5 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) > blend 1 (44.2 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>) = blend 2 (42.8 kg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>). Ammonia volatilization losses were reduced compared to urea, with values 40.49% lower for the organomineral fertilizer, 71.17% lower for blend 1, and 71.34% lower for blend 2 in the 2022/2023 season. In the second season (2023/2024), the reduction in losses was 19.61%, 36.91%, and 39.75% for the organomineral fertilizer, blend 1, and blend 2, respectively. The control treatment resulted in the highest N<sub>2</sub>O emission fluxes (1405.8 g ha<sup>-1</sup>) among the treatments evaluated, suggesting that, under the conditions of the experiment, the unfertilized soil contributed more significantly to N losses in the form of N<sub>2</sub>O compared to the tested fertilizers. The observed leaf N content remained within the adequate range (25 to 30 g N kg<sup>-1</sup>). Yield and efficiency were not influenced by the applied technologies and rates, presenting average values of 2618.5 kg ha<sup>-1</sup> (43.6 60-kg bags ha<sup>-1</sup>) and 473.4 liters of harvested coffee per 60-kg bag. The total N export, considering both grains and husks, averaged 102.6 kg ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** coffee; nitrogen fertilizers; controlled release; ammonia volatilization; nitrogen; fertilization; nitrous oxide.

## INDICADORES DE IMPACTO

O estudo sobre tecnologias para fertilizantes nitrogenados na cultura do cafeeiro contribui diretamente para a sustentabilidade da cafeicultura ao demonstrar a redução de perdas de nitrogênio e melhoria na eficiência de uso do nutriente. Os resultados demonstram que os blends de fertilizantes apresentaram uma menor taxa de volatilização de amônia em comparação à ureia convencional, reduzindo perdas em até 71,34% na safra 22/23 e 39,75% na safra 23/24. A pesquisa, conduzida em uma propriedade rural no município de Santo Antônio do Amparo – MG, envolveu diretamente a participação dos técnicos e colaboradores da fazenda, de um professor, um técnico e 14 estudantes da Universidade Federal de Lavras (UFLA), entre pós-graduandos e graduandos atuantes na iniciação científica, promovendo a formação acadêmica aplicada e a capacitação na área da pesquisa. A adoção das tecnologias estudadas tem potencial impacto econômico ao proporcionar uma gradual disponibilidade de nitrogênio no solo e redução de perdas, o que favorece a produtividade sustentável do café, sem comprometer a eficiência dos fertilizantes empregados. O caráter extensionista do trabalho se dá através da contribuição com o setor produtivo, fornecendo informações estratégicas para produtores rurais sobre o uso de tecnologias para fertilizantes nitrogenados em substituição às fontes convencionais, o que pode resultar em economia de insumos e mitigação de impactos ambientais. O estudo se alinha às áreas temáticas da Política Nacional de Extensão Universitária, principalmente nas categorias de tecnologia e produção, e meio ambiente, ao contribuir com inovações no manejo nutricional do café e melhorar a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados. Além disso, os impactos do estudo estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, destacando-se fome zero e agricultura sustentável, consumo e produção responsáveis e ação contra a mudança global do clima, ao promover uma agricultura mais sustentável, reduzir impactos ambientais e melhorar a eficiência do uso de recursos. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância do desenvolvimento de tecnologias para a fertilização do cafeeiro, contribuindo para a sustentabilidade da cafeicultura e a mitigação de impactos ambientais, além de fortalecer o vínculo entre universidade e setor produtivo na busca por práticas agrícolas mais eficientes e responsáveis.

## **SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS**

The study on nitrogen fertilizer technologies in coffee cultivation directly contributes to the sustainability of coffee farming by demonstrating the reduction of nitrogen losses and improved nutrient use efficiency. The results show that fertilizer blends had a lower ammonia volatilization rate compared to conventional urea, reducing losses by up to 71.34% in the 22/23 season and 39.75% in the 23/24 season. The research, conducted on a rural property in the municipality of Santo Antônio do Amparo – MG, directly involved the participation of farm technicians and collaborators, one professor, one technician, and 14 students from the Federal University of Lavras (UFLA), including graduate and undergraduate students engaged in scientific research, promoting applied academic training and capacity building in the research field. The adoption of the studied technologies has the potential for economic impact by providing a gradual availability of nitrogen in the soil and reducing losses, which favors sustainable coffee productivity without compromising the efficiency of the fertilizers used. The extensionist nature of the work is reflected in its contribution to the productive sector, providing strategic information to rural producers on the use of nitrogen fertilizer technologies as alternatives to conventional sources, which may lead to input savings and the mitigation of environmental impacts. The study aligns with the thematic areas of the National University Extension Policy, mainly in the categories of technology and production, and the environment, by contributing to innovations in coffee nutrition management and improving the efficiency of nitrogen fertilizer use. Furthermore, the study's impacts are aligned with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly zero hunger and sustainable agriculture, responsible consumption and production, and climate action, by promoting more sustainable agriculture, reducing environmental impacts, and improving resource use efficiency. Thus, the results obtained reinforce the importance of developing fertilization technologies for coffee cultivation, contributing to the sustainability of coffee farming and the mitigation of environmental impacts, as well as strengthening the connection between the university and the productive sector in the pursuit of more efficient and responsible agricultural practices.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Determinação do ângulo de repouso dos fertilizantes nitrogenados, pelo método do funil fixo.....	24
Figura 2. Condutivímetro portátil usado na aferição da condutividade elétrica das amostras. ....	25
Figura 3. Peneiras e quantidade retida da amostra, por peneira, para cálculo do índice de dispersão de partículas em fertilizantes nitrogenados. ....	26
Figura 4. Durômetro digital para análise de consistência dos grânulos, em kgf. ....	27
Figura 5. Aspecto físico e granulométrico da ureia convencional granulada. ....	28
Figura 6. Aspecto físico e granulométrico do fertilizante organomineral. ....	29
Figura 7. Aspecto físico e granulométrico do blend 1. ....	30
Figura 8. Aspecto físico e granulométrico do blend 2. ....	31
Figura 9. Eletromicrografia de varredura do blend 1, destacando os aspectos gerais do grânulo e seu revestimento em amarelo (A) e a espessura do revestimento de 139.4 $\mu\text{m}$ (B).....	32
Figura 10. Eletromicrografia de varredura do blend 2, destacando os aspectos gerais de um grânulo sem revestimento (A) e a espessura do revestimento de um grânulo revestido retirado da mesma amostra, medindo 30,69 $\mu\text{m}$ (B).....	33
Figura 11. Detalhe do acondicionamento dos fertilizantes em sacos de microtule (A) e montagem com adição de água deionizada (B).....	34
Figura 12. Distribuição dos sacos de nylon com fertilizante sob a projeção da copa do cafeeiro. ....	35
Figura 13. Croqui e delineamento experimental para realização das avaliações de campo. ....	37
Figura 14. Coletores semiabertos e bases instalados no campo para coleta do nitrogênio volatilizado (A) e detalhe da base após a adubação (B).....	39
Figura 15. Esquema das câmaras instaladas no campo para coleta de óxido nitroso.....	41
Figura 16. Precipitação acumulada (mm), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa (%) em função dos dias após a primeira adubação da safra 22/23. ....	47
Figura 17. Precipitação acumulada (mm), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa (%) em função dos dias após a primeira adubação da safra 23/24. ....	48
Figura 18. Porcentagem acumulada de N liberado pelos fertilizantes em condições controladas, a 21 $^{\circ}\text{C}$ , em função dos dias de incubação. (%N = liberação de nitrogênio acumulada (%); DAI = Dias após incubação).....	50

Figura 19. Porcentagem acumulada de N liberado pelos fertilizantes em condições de campo, em função dos dias após a adubação, nas safras 22/23 e 23/24. (%N = liberação de nitrogênio acumulada (%); DAA = Dias após adubação). .....	52
Figura 20. Perdas diárias de N-NH <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) e precipitação acumulada (mm) registradas na safra 22/23, durante os três parcelamentos da adubação nitrogenada. ....	55
Figura 21. Perdas acumuladas de N-NH <sub>3</sub> (em kg ha <sup>-1</sup> ) por parcelamento, para a safra 22/23. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	56
Figura 22. Perdas diárias de N-NH <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) e precipitação acumulada (mm) registradas na safra 23/24, durante os três parcelamentos da adubação nitrogenada.....	58
Figura 23. Perdas acumuladas de N-NH <sub>3</sub> (em kg ha <sup>-1</sup> ) por parcelamento, para a safra 23/24. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	59
Figura 24. Fluxo diário de N <sub>2</sub> O (em mg m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> ) após cada parcelamento da adubação nitrogenada, durante a safra 22/23. ....	61
Figura 25. Fluxos acumulados de N <sub>2</sub> O (em mg m <sup>-2</sup> ) após cada parcelamento da adubação nitrogenada, durante a safra 22/23. (Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade).....	62
Figura 26. Teores de nitrogênio foliar em função das doses aplicadas para a safra 22/23. (DN = Dose de nitrogênio, em kg ha <sup>-1</sup> ).....	66
Figura 27. Teores de nitrogênio foliar em função das doses aplicadas para a safra 23/24. (DN = Dose de nitrogênio, em kg ha <sup>-1</sup> ).....	67
Figura 28. Produtividade do cafeeiro, em kg ha <sup>-1</sup> , em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade). ....	68
Figura 29. Produtividade do cafeeiro, em kg ha <sup>-1</sup> , em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade). ....	69
Figura 30. Rendimento do cafeeiro (em litros saca de 60 kg <sup>-1</sup> ) em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	70
Figura 31. Rendimento do cafeeiro (em litros saca de 60 kg <sup>-1</sup> ) em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	71

Figura 32. Exportação de N pelos grãos (em kg ha-1) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	73
Figura 33. Exportação de N pelos grãos (em kg ha-1) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	74
Figura 34. Exportação de N pelas cascas (em kg ha-1) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	75
Figura 35. Exportação de N pelas cascas (em kg ha-1) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).....	76
Figura 36. Porcentagem de grãos retidos nas peneiras 17 e superiores em função das fontes e doses aplicadas no cafeeiro em Santo Antônio do Amparo – MG, na safra 23/24. ....	78
Figura 37. Pontuação média da análise sensorial (“prova de xícara”) para amostras de café obtidas a partir de diferentes doses e fontes de nitrogênio, em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo – MG, na safra 23/24.....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química e textural da área experimental, antes da implantação do experimento, até 1 metro de profundidade.....	36
Tabela 2. Cronograma de coletas das esponjas para quantificação da volatilização de amônia. ....	40
Tabela 3. Precipitação registrada nos 10 primeiros dias após cada parcelamento da adubação nitrogenada, nas safras 22/23 e 23/24 .....	49
Tabela 4. Perdas médias acumuladas de N-NH <sub>3</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) em diferentes fontes nitrogenadas, aplicadas em duas safras na espécie <i>Coffea arabica</i> . ....	60
Tabela 5. Fatores de emissão de N-N <sub>2</sub> O para ureia, blend 1, blend 2 e organomineral aplicados em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo - MG, Brasil. ....	63
Tabela 6. Emissões médias de N <sub>2</sub> O (g ha <sup>-1</sup> ) após aplicação de 400 kg de N por ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> . ....	64
Tabela 7. Porcentagem retida por peneira em função das doses e fontes, em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo - MG na safra 23/24.....	77
Tabela 8. Pontuação média por atributo avaliado na análise sensorial para os fertilizantes e doses estudadas e pontuação final. ....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS

CRF. *Controlled release fertilizer* (fertilizante de liberação controlada)

DAA. Dias após adubação

dag kg<sup>-1</sup>. Decagrama por quilo

DAI. Dias após incubação

DMPP. 3,4 dimetilpirazol fosfato

GSI. *Granulometric Spread Index* (Índice de dispersão de partículas)

ha. Hectare

L. Litros

N. Nitrogênio

N<sub>2</sub>O. Óxido Nitroso

NBPT. *N-(n-butyl) thiophosphoric triamide*

NH<sub>3</sub>. Amônia

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Amônio

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Nitrato

PIB. Produto Interno Bruto

sc. Sacas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 A dinâmica do nitrogênio.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Tecnologias de fertilizantes nitrogenados para o café .....</b>	<b>20</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1 Caracterização dos fertilizantes.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1.2 Características dos fertilizantes nitrogenados.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 Avaliação da liberação de nitrogênio pelos fertilizantes.....</b>	<b>33</b>
<b>3.3 Caracterização da área experimental .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 Delineamento experimental .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5 Condução do experimento.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6 Monitoramento das condições climáticas do experimento em condições de campo .....</b>	<b>38</b>
<b>3.7 Quantificação das perdas por volatilização de amônia (NH<sub>3</sub>) .....</b>	<b>39</b>
<b>3.8 Quantificação das emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).....</b>	<b>40</b>
<b>3.9 Teores foliares de N.....</b>	<b>42</b>
<b>3.10 Produtividade e rendimento.....</b>	<b>42</b>
<b>3.11 Exportação de N nos grãos e cascas .....</b>	<b>43</b>
<b>3.12 Classificação dos grãos por peneiras.....</b>	<b>44</b>
<b>3.13 Caracterização sensorial dos cafés .....</b>	<b>44</b>
<b>4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....</b>	<b>45</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 Condições climáticas nas safras 22/23 e 23/24.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2 Liberação de nitrogênio pelos fertilizantes.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 Volatilização de amônia .....</b>	<b>54</b>
<b>5.4 Emissões de óxido nitroso: safra 22/23.....</b>	<b>61</b>
<b>5.5 Teores foliares de N.....</b>	<b>65</b>
<b>5.6 Produtividade e rendimento.....</b>	<b>67</b>
<b>5.7 Exportação de N nos grãos e cascas .....</b>	<b>72</b>
<b>5.8 Classificação dos grãos por peneiras.....</b>	<b>77</b>
<b>5.9 Análise sensorial dos cafés.....</b>	<b>80</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O agronegócio brasileiro contribui com 23,8% do Produto Interno Bruto (PIB) da economia do país, considerando a participação dos ramos agrícola e pecuário no ano de 2023 (CEPEA; CNA, 2024). A relevância do setor agrícola brasileiro pode ser confirmada devido às posições de destaque assumidas pelo país na produção de “commodities”, sendo, atualmente, o maior produtor de soja e café no mundo, além de terceiro maior produtor de milho (FAOSTAT, 2024; FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE, 2024).

Dentre as “commodities” produzidas pelo país, destaca-se o café. O Brasil ocupa posição de destaque no comércio internacional, tendo atingido o recorde de exportação de café no ano de 2024, com um volume de 50,5 milhões de sacas de 60 quilos, o que resultou em uma movimentação de US\$12,3 bilhões pela atividade. Os principais destinos da produção brasileira são Estados Unidos, Alemanha, Bélgica, Itália e Japão, os quais, em conjunto, são responsáveis pela aquisição de aproximadamente 54% do volume exportado. (CONAB, 2025a).

A análise da série histórica de produção e produtividade da cultura no Brasil permite compreender a evolução do setor ao longo dos anos. Segundo a série histórica da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025b), a produção total brasileira aumentou cerca de 73% no período entre 2001 e 2024, passando de 31.300 milhões para 54.215,1 milhões de sacas de café beneficiadas. Durante o mesmo período, a produtividade ampliou em mais de 200%, avançando de 14,36 sacas por hectare para 28,8 sacas por hectare em 2024. Apesar do aumento em produção e produtividade, a área total plantada reduziu em 14% nos últimos 23 anos, considerando-se áreas em produção e em formação, o que evidencia uma evolução na eficiência produtiva no setor. Para atender ao aumento na demanda e assegurar a produção de café no país, sobretudo frente às variações climáticas, têm-se buscado alternativas que viabilizem uma produção mais eficiente e sustentável.

A eficiência no processo produtivo do café depende diretamente das técnicas de manejo empregadas ao longo de sua produção. Um dos recursos utilizados para aumentar a eficiência e a produtividade da cultura é o fornecimento de nutrientes por meio dos fertilizantes (INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION, 2020). Na cadeia produtiva do café, os fertilizantes estão entre os itens que geram maiores impactos no custo de produção, em paralelo ao custo com mão de obra em lavouras de relevo acidentado (CONAB, 2023a, 2023b).

Dentre os fertilizantes empregados na cafeicultura, os nitrogenados são requeridos em maiores quantidades, podendo atingir doses de até 450 kg por hectare em lavouras em produção

(GUERREIRO FILHO et al., 2014; QUAGIO et al. 2022). A grande dificuldade no manejo da adubação nitrogenada consiste no fato de que o nitrogênio (N) possui uma dinâmica complexa no solo e passa por transformações e processos que levam à sua perda, como a volatilização (N-NH<sub>3</sub>), a lixiviação (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e processos de nitrificação e desnitrificação (N<sub>2</sub>O) (GONZÁLES VILLALBA et al., 2014; TRENKEL, 2010). A ureia é o fertilizante nitrogenado utilizado em maiores quantidades na agricultura por apresentar alta concentração de N (em torno de 45%) e menor custo de produção. No entanto, é uma fonte que apresenta perdas por volatilização que podem variar entre 18,5% a 38,4% do N aplicado a depender das condições ambientais e das características do solo (CHAGAS ET AL. 2016; DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017; FREITAS, 2020; HERNÁNDEZ LÓPEZ, 2024). Além da volatilização, o N pode sofrer perdas através da emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) na atmosfera, o qual possui potencial de aquecimento global (do inglês *Global Warming Potential*, GWP) em torno de 273 vezes maior em relação ao CO<sub>2</sub> (GWP = 1), considerando-se um horizonte temporal de 100 anos (IPCC, 2023).

Para mitigar possíveis impactos ambientais gerados pelo uso de fertilizantes nitrogenados e aumentar o seu aproveitamento, uma das alternativas adotadas na agricultura é o uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada (ALMEIDA, 2016; TRENKEL, 2010).

A eficiência de recuperação de um nutriente pode ser quantificada ao avaliar a quantidade de nutriente absorvida pela planta em relação à quantidade aplicada no solo, em um determinado período (TRENKEL, 2010). Dessa maneira, quando um fertilizante possui eficiência agrônômica superior ao fertilizante na sua forma convencional, dizemos que este é um fertilizante de eficiência aumentada (TIMILSENA et al., 2014). Uma das tecnologias disponíveis para aumentar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados são os fertilizantes de liberação controlada.

Fertilizantes nitrogenados de liberação controlada são obtidos por meio do recobrimento de grânulos de ureia convencionais com o objetivo de controlar a passagem de água e difusão do nutriente, a dissolução do adubo no solo e conseqüentemente, garantir disponibilização gradual do nutriente para a planta (GUELFY, 2017). Essa tecnologia tem uma série de vantagens, como a aplicação do nutriente em dose única em detrimento à aplicação parcelada no caso da ureia convencional, a disponibilização gradual do nitrogênio para as plantas ao longo de uma safra além da redução das perdas por volatilização de N-NH<sub>3</sub> (CHAGAS et al., 2016; FREITAS et al., 2022). Tem-se optado por realizar a combinação entre fertilizantes de liberação controlada com outras tecnologias, como os fertilizantes nitrogenados estabilizados (a exemplo

da ureia tratada com NBPT) para adequar o período de liberação do nutriente em campo e, ao mesmo tempo, reduzir as perdas por volatilização de amônia e óxido nitroso.

Outra tecnologia empregada para o fornecimento de nitrogênio é o fertilizante organomineral. Segundo a instrução normativa n° 61, de 08 de julho de 2020 (MAPA, 2020), fertilizantes organominerais são produtos obtidos por meio da combinação entre uma fonte de nutrientes mineral e uma fração orgânica, advinda de matéria-prima de origem urbana, agropecuária ou industrial. Esse produto deve atender as garantias mínimas estabelecidas pela legislação brasileira, a qual apresenta os teores mínimos exigidos de CTC, carbono orgânico, umidade máxima e teores mínimos para macros e micronutrientes, considerando-se produtos de natureza sólida ou fluida, aplicados via solo ou fertirrigação (MAPA, 2020). O uso desse tipo de produto apresenta-se como uma excelente alternativa para o reaproveitamento de resíduos (ANTILLE et al., 2017). Porém, há divergências entre estudos desenvolvidos quanto a performance de fertilizantes organominerais, com resultados de desempenho superior (PEREIRA et al., 2022, UDDIN et al., 2023), inferior (HERNÁNDEZ LÓPEZ, 2024; ANTILLE et al., 2017) ou equivalente (HERNÁNDEZ LÓPEZ, 2024; MUMBACH et al., 2020) ao de fontes convencionais, o que evidencia a necessidade de novos estudos que possam elucidar as potencialidades do fertilizante organomineral e suas recomendações para os cafeicultores.

Diante do cenário apresentado, objetivou-se com esse trabalho: a) avaliar a tecnologias de fertilizantes nitrogenados para lavouras cafeeiras em produção ; b) caracterizar a curva de liberação do N das tecnologias para fertilizantes nitrogenados em campo e laboratório; c) quantificar as perdas por volatilização de amônia (N-NH<sub>3</sub>) e emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) dos fertilizantes; d) avaliar os teores foliares de N, produtividade, rendimento e exportação do nutriente pelos grãos e cascas do café.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 A dinâmica do nitrogênio**

Dentre os nutrientes requeridos pelas plantas, o nitrogênio (N) é um dos mais limitantes para a produtividade, visto que desempenha papéis relevantes no metabolismo da planta, participando da formação de proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos e como constituinte da clorofila, dentre outras funções (MALAVOLTA, MORAES, 2006; XU, FAN e MILLER, 2012).

A dinâmica do nitrogênio é bastante complexa, pois o nutriente sofre transformações diversas tanto no solo quanto na atmosfera, podendo entrar no sistema solo-planta de diferentes formas: fixação biológica, descargas elétricas na atmosfera, adubação química, matéria orgânica e precipitações. (CANTARELLA, 2007).

O nitrogênio pode ser encontrado tanto na forma orgânica quanto inorgânica. O N orgânico está presente na matéria orgânica do solo em uma forma que não está prontamente disponível às plantas, isto é, necessita ser mineralizado e transformado em uma de suas formas inorgânicas passíveis de serem absorvidas, como amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). Essa mineralização é mediada pela ação de microorganismos e depende de fatores como temperatura, umidade e pH do solo. (CANTARELLA, 2007; FAQUIN, 2005). Já a saída do nutriente do sistema solo-planta se dá através da absorção pela planta e exportação pelas colheitas, perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação, além das perdas por erosão e escoamento superficial (VIEIRA, 2017).

A eficiência das adubações nitrogenadas nos cultivos agrícolas está atrelada às perdas anteriormente citadas, principalmente ao considerarmos que a principal fonte utilizada para o suprimento da demanda de N nas lavouras é a ureia (forma amídica). A ureia é hidrolisada pela enzima urease, formando amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), forma passível de perda por volatilização quando rapidamente convertida a amônia ( $\text{NH}_3$ ) (CANTARELLA, 2007; VIEIRA, 2017), o que ocorre sobretudo quando é aplicada em superfície. Essa é a forma de perda de N mais significativa para as condições brasileiras, visto que é influenciada pelas condições ambientais. As perdas por volatilização de amônia pelo uso da ureia variam entre culturas, formas de manejo e condições ambientais, havendo registros de perdas na cultura do café que vão de 1% a 38% (RODRIGUES et al., 2016; DOMINGHETTI et al., 2016; DE SOUZA et al., 2023; HERNÁNDEZ LÓPEZ et al., 2024; FREITAS et al., 2023).

A lixiviação de nitrogênio acontece quando o nutriente atinge profundidades não exploradas pelas raízes das plantas, o que pode ocorrer quando o amônio é oxidado a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e posteriormente a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sendo esta última forma suscetível à perda descrita. No entanto, as perdas de N por lixiviação não são comuns para as condições de solo brasileiras. Em um estudo conduzido por Sarkis et al. (2023b) durante 6 safras na cultura do café, os autores avaliaram a movimentação do N mineral no solo e observaram estoques do nutriente até 1 metro de profundidade variando de 17 até 33 toneladas por hectare. Os autores concluíram que a realização de adubações, a cada ano, com doses excessivas de N, resulta em uma maior movimentação de N mineral para as camadas subsuperficiais, favorecendo a formação dos

estoques em profundidade. Em outro estudo conduzido por Freitas et al. (2020) também foram quantificados os estoques de N até 0,6 metros de profundidade. Os autores observaram que os estoques de N no tratamento controle reduziram ao longo do tempo, visto que as plantas não receberam fertilização com N via adubação e, conseqüentemente, utilizaram-se dos estoques contidos no solo, o que reduziu o teor de N mineral em profundidade ao longo dos anos. Esses estudos ressaltam a relevância dos estoques de N como reserva no solo em áreas advindas de sistemas de cultivos já estabelecidos, além da importância de aplicação da dose adequada de nitrogênio.

A perda de N no sistema também pode ocorrer por nitrificação e desnitrificação. A nitrificação é o processo pelo qual o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) é convertido a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e, posteriormente, a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mediado pela ação de bactérias aeróbicas. Durante a conversão de amônio a nitrito, pode ocorrer a formação de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o que gera perdas de N para a atmosfera. Já a desnitrificação é o processo de redução anaeróbica do nitrato, onde o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) é convertido a nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), óxido nítrico (NO), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e, finalmente, em gás dinitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Em ambos, há perda de N para a atmosfera, no entanto, as características do ambiente são determinantes para a ocorrência desses processos, como temperatura, textura do solo, disponibilidade de oxigênio, pH, presença de microorganismos específicos, dose de adubação (SARKIS et al., 2023b; TRENKEL, 2010; VIEIRA, 2017; UCHIDA e VON REIN, 2018; ZHANG et al., 2017). Nos solos brasileiros, predominam as perdas de óxido nitroso via nitrificação, visto que os solos são bem drenados, o que favorece a aeração e, conseqüentemente, a ação das bactérias nitrificantes em relação às desnitrificantes (SARKIS et al., 2023b; SOARES, 2016).

## **2.2 Tecnologias de fertilizantes nitrogenados para o café**

A ureia é a fonte nitrogenada mais utilizada para suprir as demandas de nitrogênio na agricultura. Devido às suas perdas por volatilização da amônia (FREITAS et al., 2022; OTTO et al., 2017), busca-se novas alternativas e tecnologias que possam melhorar a eficiência de uso da ureia na agricultura. Nesse sentido, pode-se citar os fertilizantes de eficiência aumentada (GUELFY, 2017; TIMILSENA ET AL., 2014).

Os fertilizantes de eficiência aumentada promovem melhor aproveitamento dos nutrientes quando comparados às fontes convencionais (TRENKEL, 2010; TIMILSENA ET

AL., 2014) e podem ser classificados em 3 categorias: estabilizados, liberação lenta e liberação controlada (GUELFY, 2017).

Fertilizantes estabilizados são obtidos quando a ureia recebe um tratamento com aditivos, cujo intuito é promover a inibição da atividade da urease envolvida no processo de quebra da ureia, e reduzir perdas por volatilização de amônia (DA FONSECA ET AL., 2023), sendo NBPT (*N*-(*n*-butyl) thiophosphoric triamide) uma das principais moléculas que atuam na inibição da urease. Além dos inibidores de urease, os inibidores da nitrificação, como o DMPP (3,4 dimetilpirazol fosfato), podem ser adicionados à ureia, com objetivo de retardar a atividade dos microorganismos responsáveis pela conversão do amônio a nitrato (MOTA ET AL., 2015).

Fertilizantes nitrogenados de liberação controlada são obtidos através do recobrimento de fertilizantes convencionais solúveis, como a ureia, com material que atue como barreira à passagem de água do meio para o grânulo do fertilizante e controlando, assim, a liberação de nitrogênio pela difusão. Alguns fatores como temperatura, umidade do solo, espessura e material de confecção do revestimento influenciam diretamente na taxa de liberação do nutriente do grânulo para o ambiente (GUELFY, 2017). Esse mecanismo de regulação na disponibilização do N é adotado visando a redução de perdas de N por volatilização de N-NH<sub>3</sub>, redução das emissões de gases de efeito estufa como o N<sub>2</sub>O, além do nutriente ser liberado de maneira gradual, ofertando N para a cultura ao longo da safra (ARROBAS et al., 2022).

A tecnologia de liberação controlada torna-se uma estratégia importante para reduzir perdas e garantir uma produção mais sustentável. As pesquisas voltadas para fertilizantes de liberação controlada dedicam-se a demonstrar o potencial da tecnologia, como a liberação gradual para atender as demandas das plantas, perdas reduzidas por volatilização e lixiviação, eficiência no uso de nutrientes e redução das emissões de óxido nitroso. (ARROBAS et al., 2022; TIMILSENA et al., 2014; VEJAN et al., 2021). No entanto, são necessários mais estudos para elucidar a eficiência de liberação dos nutrientes, o desenvolvimento de compostos biodegradáveis para o revestimento do fertilizante, além de redução de custos da tecnologia, tornando-a acessível aos produtores (VEJAN et al., 2021).

Uma alternativa para redução de custos e melhor associação entre taxa de liberação do fertilizante e a necessidade da cultura é a associação entre as tecnologias na forma de blends. Os blends são compostos por uma mistura física entre grânulos de liberação controlada e convencionais, ou com o uso da ureia tratada com NBPT com a finalidade de reduzir custos,

evitando a necessidade de entradas sucessivas nas lavouras devido ao parcelamento da adubação nitrogenada (ZHANG ET AL., 2021a).

### **2.3. Fertilizantes organominerais para o café**

Fertilizantes especiais são produtos que possuem características específicas em sua formulação ou a presença de aditivos, os quais promovem ganhos às plantas, ao solo ou ao ambiente quando comparados às fontes convencionais. O consumo de fertilizantes especiais, representados por fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais, condicionadores de solo e biofertilizantes, tem tido um crescimento expressivo no Brasil. Nos últimos 10 anos, o faturamento desse setor apresentou um crescimento médio anual de 21,2% e, dentre o volume total comercializado, 9,7% é destinado à produção de café, tornando-o a terceira cultura que mais demanda esses fertilizantes no país (ABISOLO, 2024).

Um dos fertilizantes especiais que tem ganhado espaço no mercado nacional são os fertilizantes organominerais. Fertilizantes organominerais são criados a partir da combinação de uma fonte de nutrientes de origem mineral associada a uma fração orgânica, podendo ser apresentado na forma de grânulos, pellets, pó, farelado, pastilhas e até mesmo na forma fluida (MAPA, 2020).

Para que um produto seja classificado como um fertilizante organomineral, deve-se conhecer a origem da matéria prima utilizada em sua formulação, a qual pode ter origem industrial, agropecuária e até mesmo urbana, desde que seja segura para utilização agrícola e evite a contaminação sanitária. Além da origem da matéria prima, o produto deve atender as garantias mínimas exigidas, como teor mínimo de carbono orgânico de 8% para produtos sólidos e 3% para produtos líquidos, CTC mínima de 80 mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> para produtos sólidos e umidade máxima de 20% para produtos sólidos, além de garantias quanto aos teores mínimos para macros e micronutrientes quando garantidos de maneira isolada ou em misturas (MAPA, 2020).

A utilização de fertilizantes organominerais tem-se mostrado como uma alternativa interessante para uso agrícola, visto que possibilita a reutilização e destinação correta para resíduos agropecuários, industriais e urbanos. Subprodutos como lodo de esgoto, resíduos de

atividades extrativistas, dejetos de animais e subprodutos de origem vegetal e mineral podem ser empregados na composição do fertilizante organomineral (MAPA, 2020).

Além do reaproveitamento de resíduos, ganhos como aumento no teor de matéria orgânica no solo, melhorias nas características físicas, químicas e biológicas do solo, e redução de perdas de nutrientes são pontos desejáveis com o uso do fertilizante organomineral. Em um estudo conduzido com fertilizantes organominerais nitrogenados na cultura do café, Hernández López (2024) observou redução nas perdas por volatilização de amônia quando realizada aplicação em dose única em relação à ureia convencional. No entanto, no mesmo estudo, o autor concluiu que as perdas por volatilização aumentaram em relação a ureia convencional quando a aplicação do mesmo fertilizante organomineral foi dividida em 3 aplicações. Já em outro estudo conduzido por Silva (2024), o autor avaliou o desempenho de uso de fertilizantes organominerais fosfatados na sucessão soja-milho, em uma área de plantio direto consolidado, comparado a fontes convencionais como fosfato monoamônico (MAP) e supersimples (SS), e seus efeitos no aumento da atividade microbiana no solo. Foi possível observar que não houve diferença de produtividade entre as fontes organominerais e convencionais, além de não apresentar alteração na atividade enzimática no solo, dentro do período avaliado.

Apesar dos ganhos mencionados, o uso dos fertilizantes organominerais ainda é reduzido quando comparado às fontes minerais, devido à baixa concentração de nutrientes em sua composição e aos desafios quanto às características físicas dos produtos (BENITES et al., 2010). Além disso, os efeitos do uso de fertilizantes organominerais ainda são pouco elucidados, sobretudo para fertilizantes organominerais nitrogenados na cafeicultura, campo de estudo que deve ser explorado para trazer respostas quanto aos benefícios e particularidades de uso desta fonte.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização dos fertilizantes**

##### **3.1.1 Avaliações realizadas**

A fim de caracterizar os fertilizantes utilizados na condução deste experimento, foram realizadas as seguintes avaliações:

**Ângulo de repouso:** está diretamente relacionado a fluidez de um produto (KRISHNA e SHIVAJI, 2021; SCHULZE, 1996). A determinação do ângulo de repouso foi feita pelo método do funil fixo, conforme descrito por AL-HASHEMI e AL-AMOUDI, (2018). Com auxílio de um funil fixo e uma caixa de base retangular em acrílico, foram escoados 2 quilos do fertilizante a uma velocidade constante, obtendo-se o ângulo de repouso através de relações trigonométricas, onde:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{CO}{CA}\right)$$

$\alpha$  = ângulo de repouso, em graus (°)

CO = cateto oposto (altura da pilha, em centímetros)

CA = cateto adjacente (base da pilha, em centímetros)

Figura 1. Determinação do ângulo de repouso dos fertilizantes nitrogenados, pelo método do funil fixo.



Fonte: Da autora, 2024.

**Índice salino:** indica o aumento de pressão osmótica quando um fertilizante é adicionado ao solo, tendo como referência o nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ). O índice foi calculado para todas as fontes de acordo com a metodologia descrita no manual de métodos analíticos oficiais do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2023). Para a determinação, foram adotadas 4 repetições para cada fertilizante. Cada repetição era constituída por 1 g de fertilizante dissolvido em 100 mL de água deionizada, além da adição de 0,6 mL da enzima urease, a fim de hidrolisar

a ureia. A solução de referência foi preparada com  $\text{NaNO}_3$  a  $10\text{g L}^{-1}$ . A condutividade elétrica foi aferida com condutivímetro portátil DIST6 Hanna, medida em  $\text{mS cm}^{-1}$  e o valor do índice salino expresso em porcentagem, calculado com base na fórmula:

$$\text{IS (\%)} = \frac{100 \cdot \text{CE 1}}{\text{CE 2}}$$

IS = Índice salino, em %

CE 1 = condutividade elétrica da amostra, em  $\text{mS cm}^{-1}$

CE 2 = condutividade elétrica da solução de  $\text{NaNO}_3$  de referência, em  $\text{mS cm}^{-1}$

Figura 2. Condutivímetro portátil usado na aferição da condutividade elétrica das amostras.



Fonte: Da autora, 2024.

**Índice de dispersão de partículas (GSI, do inglês *Granulometric Spread Index*):** mede a dispersão do tamanho de partículas de um fertilizante, influenciando diretamente na segregação do produto durante a aplicação. O cálculo do índice GSI foi realizado com base na metodologia descrita no manual de métodos analíticos oficiais do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2023), utilizando-se amostras de 125g dos fertilizantes e peneiras de malhas 4,8 mm, 3,36 mm; 2,8 mm; 2,0 mm; 1,0 mm e 500  $\mu\text{m}$ , dispostas em ordem decrescente. A amostra foi agitada por 10 minutos em agitador mecânico, sendo calculado o índice com base nas orientações da metodologia.

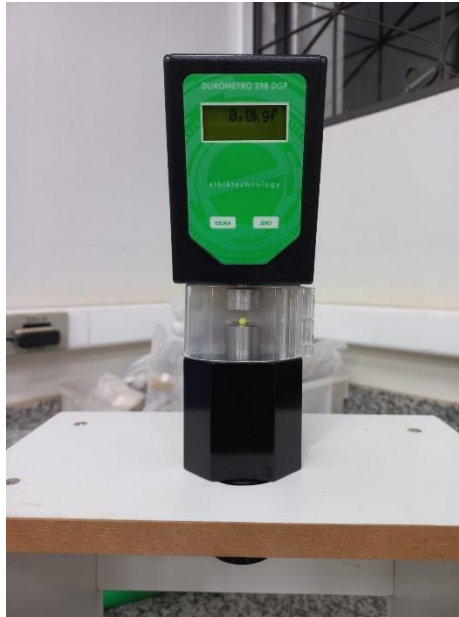
Figura 3. Peneiras e quantidade retida da amostra, por peneira, para cálculo do índice de dispersão de partículas em fertilizantes nitrogenados.



Fonte: Da autora, 2024.

**Dureza ou consistência dos grânulos:** está relacionada à capacidade dos grânulos de resistirem a quebra ou abrasão quando submetidos a uma pressão, o que afeta o manuseio e armazenamento desses produtos (RODELLA e ALCARDE, 2000, RUTLAND, 1986). Para a determinação da dureza, foi utilizado um durômetro digital 298 DGP Ethik technology. Os grânulos passaram previamente por peneiras, sendo avaliados 30 grânulos retidos nas peneiras de 3,36, 2,0 e 1,0 mm de cada fertilizante. Foi calculada a média, em kgf, para cada fonte e peneira. Para o blend 2 foi feita a separação dos grânulos com base na coloração, sendo grânulos do tipo 1 de coloração amarela e grânulos do tipo 2, de coloração bege, subentendendo-se que cada cor possa corresponder a uma tecnologia diferente da outra. Assim, foi determinada a dureza por tipo de grânulo, comparando-se a média dentre aqueles de mesma coloração.

Figura 4. Durômetro digital para análise de consistência dos grânulos, em kgf.



Fonte: Da autora, 2024.

### 3.1.2 Características dos fertilizantes nitrogenados

Os fertilizantes selecionados para a pesquisa foram caracterizados com base em suas garantias de concentração de nitrogênio e em seus aspectos físicos e químicos, cujas metodologias de avaliação foram descritas no tópico 3.1.

**Ureia convencional:** fertilizante granulado com 46% de N. As avaliações físicas demonstraram que o ângulo de repouso foi de 32,9°, o índice salino de 75,9%, o índice de dispersão de partículas (GSI, do inglês *Granulometric Spread Index*) de 26,72 e a dureza média dos grânulos retidos entre as peneiras 4,0 a 3,36, 3,36 a 2,0 e 2,0 a 1,0 mm foi, respectivamente, de 3,30 kgf, 2,55 kgf e 1,75 kgf.

Figura 5. Aspecto físico e granulométrico da ureia convencional granulada.



Fonte: Da autora, 2024.

**Organomineral:** fertilizante sem especificação granulométrica, contendo 25% de N. Foi obtido através da mistura física entre uma fração mineral, composta por ureia convencional e uma fração orgânica à base de composto orgânico e substâncias húmicas, na proporção de 57% de ureia e 43% de composto (Figura 6). O produto apresenta 8,4% de carbono orgânico, aditivado com 0,3% de substâncias húmicas, CTC de 103  $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e umidade máxima de 15%. Segundo as avaliações realizadas, o ângulo de repouso para o organomineral é de 33,76°, o índice salino de 71,44%, o índice de dispersão de partículas de 63,16 e a dureza foi mensurada apenas para o retido na peneira entre 2,0 e 1,0 mm, visto que não existem grânulos de ureia maiores neste fertilizante, com média de 0,9 kgf por grânulo.

Figura 6. Aspecto físico e granulométrico do fertilizante organomineral.



Fonte: Da autora, 2024.

**Blend 1:** fertilizante granulado, com 39% de N. É um blend (mistura) de grânulos composto por proporções desconhecidas entre as diferentes tecnologias (estabilizados e liberação controlada) e espessuras de revestimento. Para as avaliações realizadas nesta tecnologia, foi quantificado o ângulo de repouso de 29,97°, o índice salino de 48,99%, o índice de dispersão de partículas de 28,18 e a dureza média dos grânulos retidos entre as peneiras 4,0 a 3,36, 3,36 a 2,0 e 2,0 a 1,0 mm foi, respectivamente, de 2,90 kgf, 2,74 kgf e 1,74 kgf.

Figura 7. Aspecto físico e granulométrico do blend 1.



Fonte: Da autora, 2024.

**Blend 2:** fertilizante granulado, com 43% de N. É um blend (mistura) de grânulos composto por proporções desconhecidas entre as diferentes tecnologias (estabilizados e liberação controlada) e espessuras de revestimento. A partir das avaliações, foram obtidos valores de 28,52° para ângulo de repouso, 20,10% para o índice salino e o índice de dispersão de partículas de 31,38. Para avaliar a dureza média dos grânulos, os mesmos foram separados em grânulos tipo 1 e tipo 2, de acordo com a separação baseada na coloração dos grânulos. A dureza média para os grânulos do tipo 1 retidos entre as peneiras 4,0 a 3,36, 3,36 a 2,0 e 2,0 a 1,0 mm foi, respectivamente, de 3,32 kgf, 3,06 kgf e 1,68 kgf. Já para os grânulos do tipo 2, a dureza média para as mesmas peneiras foi de 3,54 kgf, 3,47 kgf e 2,47 kgf.

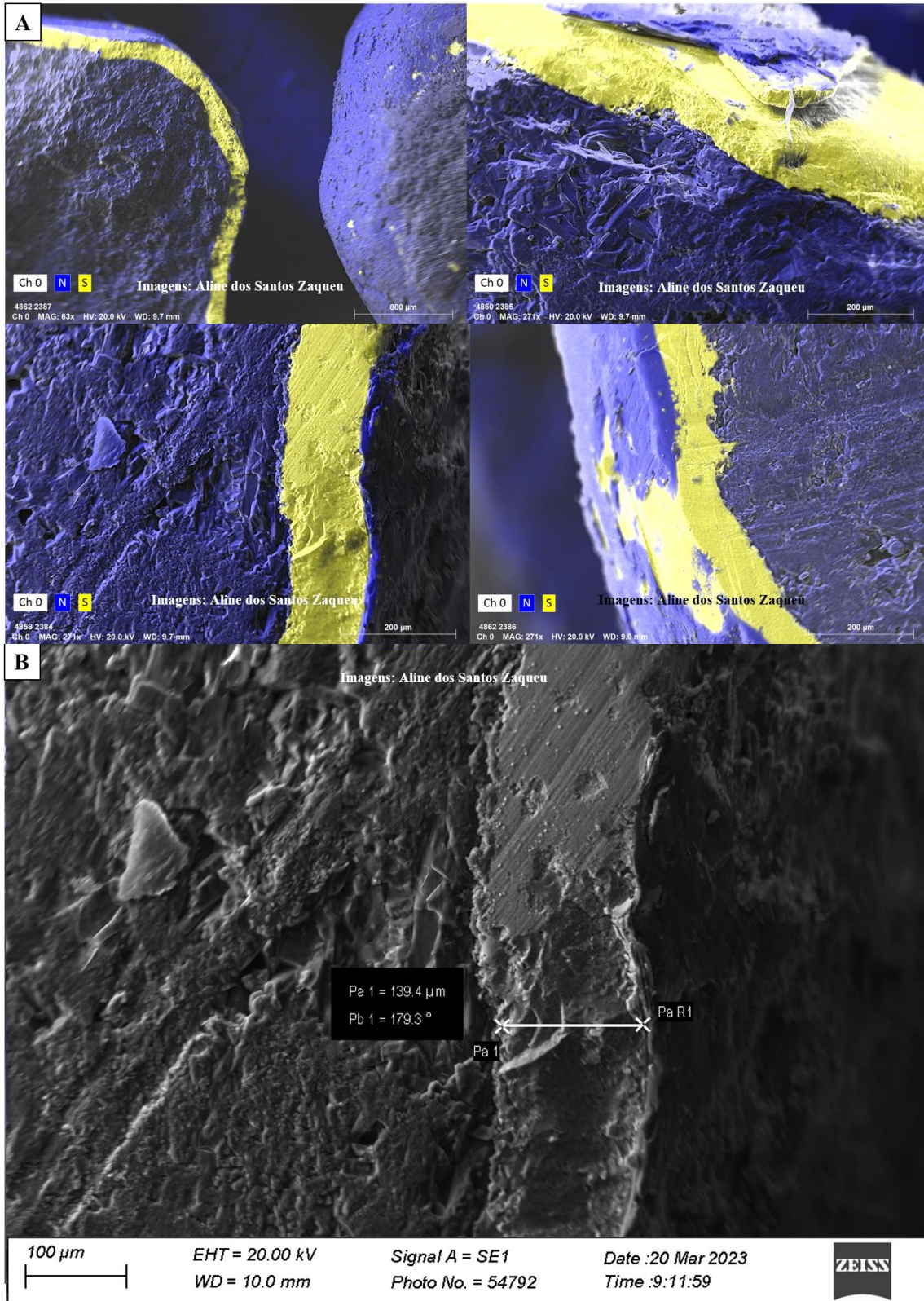
Figura 8. Aspecto físico e granulométrico do blend 2.



Fonte: Da autora, 2024.

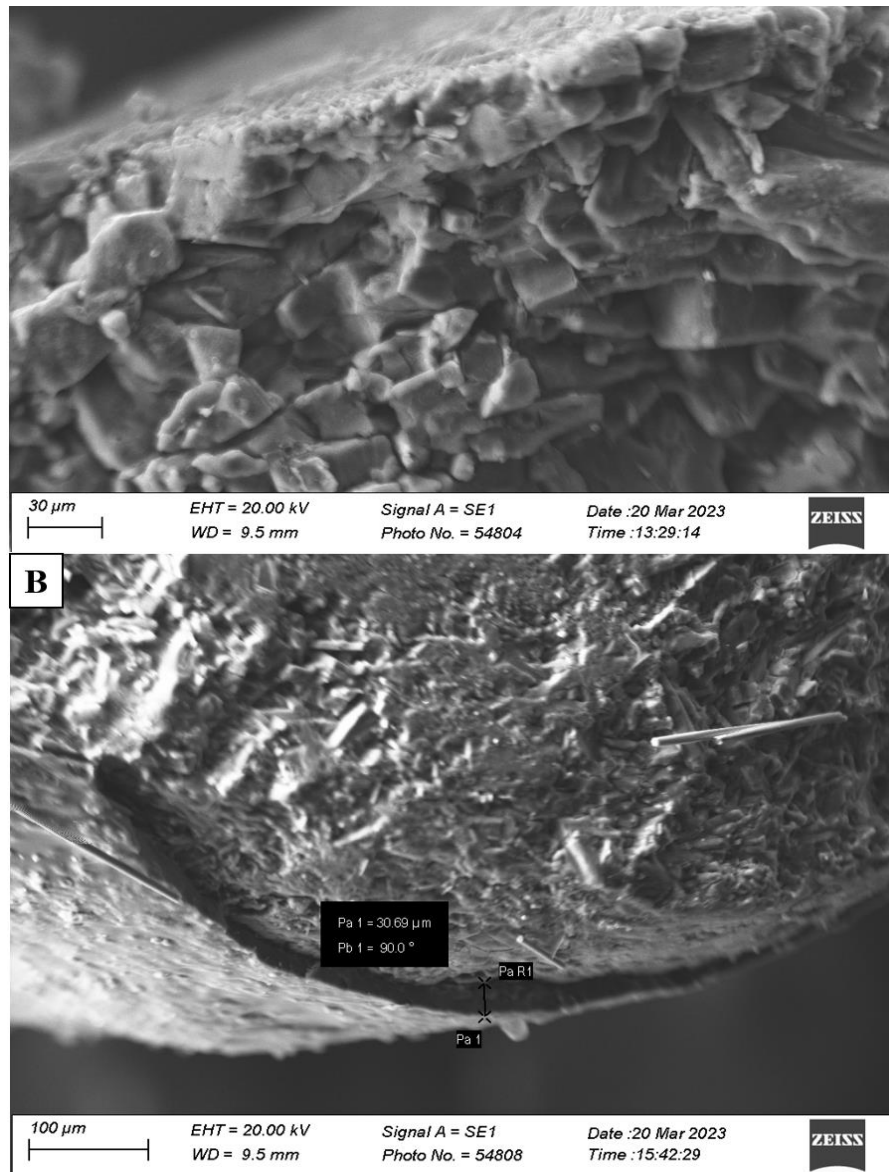
Além da caracterização física e química, os blends foram caracterizados por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise foi realizada na Universidade Federal de Lavras, no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural (LME). Foram selecionados grânulos de cada amostra de fertilizantes, os quais foram cortados com auxílio de um bisturi, metalizados e posteriormente observados em um microscópio eletrônico de varredura. As imagens obtidas para os blends 1 e 2 encontra-se nas figuras 9 e 10.

Figura 9. Eletromicrografia de varredura do blend 1, destacando os aspectos gerais do grânulo e seu revestimento em amarelo (A) e a espessura do revestimento de 139.4 µm (B).



Fonte: Da autora, 2024.

Figura 10. Eletromicrografia de varredura do blend 2, destacando os aspectos gerais de um grânulo sem revestimento (A) e a espessura do revestimento de um grânulo revestido retirado da mesma amostra, medindo 30,69  $\mu\text{m}$  (B).



Fonte: Da autora, 2024.

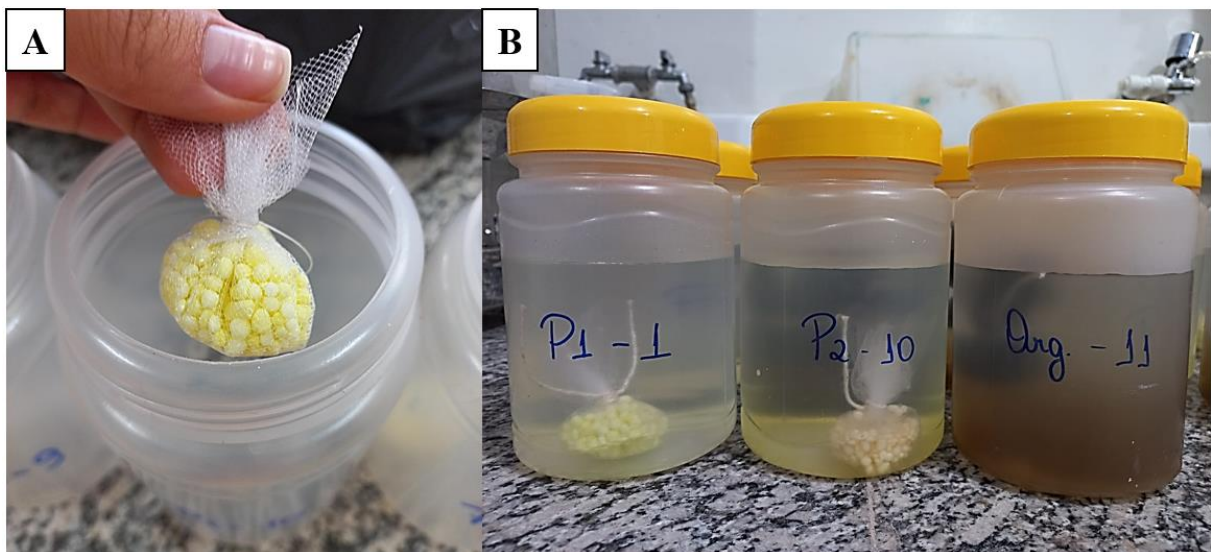
### 3.2 Avaliação da liberação de nitrogênio pelos fertilizantes

A liberação de nitrogênio dos fertilizantes blend 1, blend 2 e organomineral foi avaliada em laboratório e em campo, conforme metodologias adotadas por Freitas et al. (2023). A ureia convencional não foi avaliada nos testes de liberação, devido à sua rápida solubilização,

minutos após entrar em contato com a umidade, o que não justifica a realização do teste a longo prazo para essa fonte.

A longevidade de um fertilizante é determinada pelo tempo necessário para que o produto atinja uma taxa mínima de liberação de 75% do nutriente avaliado (ISO, 2017). Para avaliar a liberação em condições controladas, utilizou-se a metodologia ISO 18644:2016 (2016), adotando-se a temperatura de 21°C. Para os blends 1 e 2, foram adotadas 5 repetições cada, compostas por 10 g de fertilizante acondicionados em pequenos sacos de tecido microtule, o qual permite a passagem de água, e permanecendo submersos por 500 mL de água destilada. Para o organomineral, devido à facilidade de perda da fração em pó do fertilizante, foram adotadas 6 repetições com 10 g de fertilizante cada, acondicionados em pequenos sacos de tecido do tipo “TNT”, que permite a passagem de água e evita a perda do fertilizante e de suas frações mais finas para a água.

Figura 11. Detalhe do acondicionamento dos fertilizantes em sacos de microtule (A) e montagem com adição de água deionizada (B).



Fonte: Da autora, 2024.

Após a montagem, o experimento foi conduzido em uma incubadora a 21°C, sendo as coletas realizadas em 1, 7, 14, 28, 42, 56, 77, 98, 126, 154 e 196 dias.

A cada coleta, os saquinhos com fertilizante foram retirados de cada pote, o conteúdo foi homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro e foram reservados cerca de 60 mL para posterior determinação de N. O restante da água era descartado, acrescentando-se outros 500 mL de água destilada ao recipiente, retornando-o à incubadora e repetindo-se o processo nas próximas coletas.

Para determinação do teor de N nas amostras coletadas, pipetou-se 5 mL da solução, sendo o volume acrescido de 3 mL de ácido sulfúrico concentrado e 0,2 g de uma mistura catalisadora composta por sulfato de potássio e sulfato de cobre. Posteriormente, as amostras foram levadas ao bloco digestor, com aumento gradual da temperatura até atingir 350°C, completando-se dessa maneira a digestão da amostra. A destilação foi realizada pelo método Kjeldahl e posterior titulação com ácido clorídrico.

Já o teste de liberação de nitrogênio em condições de campo foi conduzido com base na metodologia descrita por Freitas et al. (2023). No primeiro dia de adubação foram dispostos na projeção da copa nas parcelas previamente determinadas, 13 sacos de nylon (dimensões de 13 x 18 cm) de malha 1.8 mm e contendo 40 gramas de fertilizante em cada um deles, devidamente selados para evitar a perda de fertilizante.

Figura 12. Distribuição dos sacos de nylon com fertilizante sob a projeção da copa do cafeeiro.



Fonte: Da autora, 2024.

As coletas ocorreram em datas pré-estabelecidas (aos 7, 14, 28, 42, 56, 77, 98, 126, 154 e 196 dias, sendo a última coleta no dia da colheita) após a adubação. Após retirados do campo, foram removidos quaisquer possíveis resíduos de solo e folha dos sacos. As amostras foram trituradas com o auxílio de gral e pistilo. Em seguida, foram pesados 0,1 g do fertilizante triturado, no qual foram adicionados 3 mL de ácido sulfúrico concentrado e 0,2 g de uma mistura catalisadora composta por sulfato de potássio e sulfato de cobre.

Posteriormente, as amostras foram levadas ao bloco digestor, com aumento gradual da temperatura até atingir 350°C, completando-se dessa maneira a digestão da amostra. A destilação foi realizada pelo método Kjeldahl e posterior titulação com ácido clorídrico.

### 3.3 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado no município de Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais, Brasil (20°53'38.9"S 44°56'07.0"W, altitude de 1016 m), em uma lavoura comercial da Fazenda Samambaia, durante as safras 2022 – 2023 e 2023 – 2024. O clima da região é classificado como Cwa, com verões quentes e úmidos e invernos secos e frios.

A lavoura foi implantada em 2018 com o cultivo da espécie *Coffea arabica* L., cultivar Catuaí Amarelo IAC 62. O espaçamento é de 3,80 m x 0,50 m e foi conduzida em consórcio com braquiária nas entrelinhas do café.

O solo é caracterizado como Latossolo Vermelho e sua análise química e textural foi realizada previamente à instalação do experimento, coletando-se amostras de 0 a 100 cm de profundidade. Os resultados da análise encontram-se na tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química e textural da área experimental, antes da implantação do experimento, até 1 metro de profundidade.

Parâmetro	Unidade	Profundidade de coleta (cm)					
		0-5	05-10	10-20	20-40	40-60	60-100
pH	-	4.85	4.77	4.94	5.01	5.01	4.98
P	mg/dm <sup>3</sup>	3.52	1.85	1.36	3.2	3.27	3.06
K <sup>+</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	114.31	71.94	71.46	90.83	114.79	96.57
Ca <sup>+2</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	2.24	1.91	2.3	2.11	1.65	0.96
Mg <sup>+2</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	0.9	0.7	0.71	0.68	0.63	0.39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	31.32	37.23	30.48	24.2	55.42	65.2
Cu	mg/dm <sup>3</sup>	4.7	4.59	4.41	3.68	3.14	2.92
B	mg/dm <sup>3</sup>	0.89	0.91	0.82	0.5	0.39	0.32
Zn	mg/dm <sup>3</sup>	2.82	2.58	2.19	0.81	0.39	0.5
Fe	mg/dm <sup>3</sup>	47.05	40.53	43.23	39.35	28.72	24.92
Mn	mg/dm <sup>3</sup>	6.36	7.76	8.66	5.45	5.63	4.52
Al <sup>+3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	0.34	0.44	0.24	0.17	0.18	0.21
(H+Al)	cmolc/dm <sup>3</sup>	7.77	8.64	6.92	4.89	4.99	5.26
Soma de bases (SB)	cmolc/dm <sup>3</sup>	3.44	2.79	3.2	3.03	2.58	1.6
CTC efetiva (t)	cmolc/dm <sup>3</sup>	3.78	3.23	3.44	3.2	2.76	1.81
CTC potencial (T)	cmolc/dm <sup>3</sup>	11.21	11.43	10.12	7.92	7.57	6.86
Sat. Al <sup>3+</sup> (m)	%	8.99	13.62	6.97	5.31	6.52	11.6
Sat. Bases (V)	%	30.68	24.4	31.62	38.25	34.08	23.32
Matéria orgânica	%	3.73	3.91	3.21	3.19	2.47	1.67
P-remanescente	mg/L	20.51	18.83	17.81	16.32	14.74	11.58
Areia	g/kg	191.5	157	124.8	123.6	124.8	87.9
Silte	g/kg	84.3	120	117.6	120	118.8	118.8

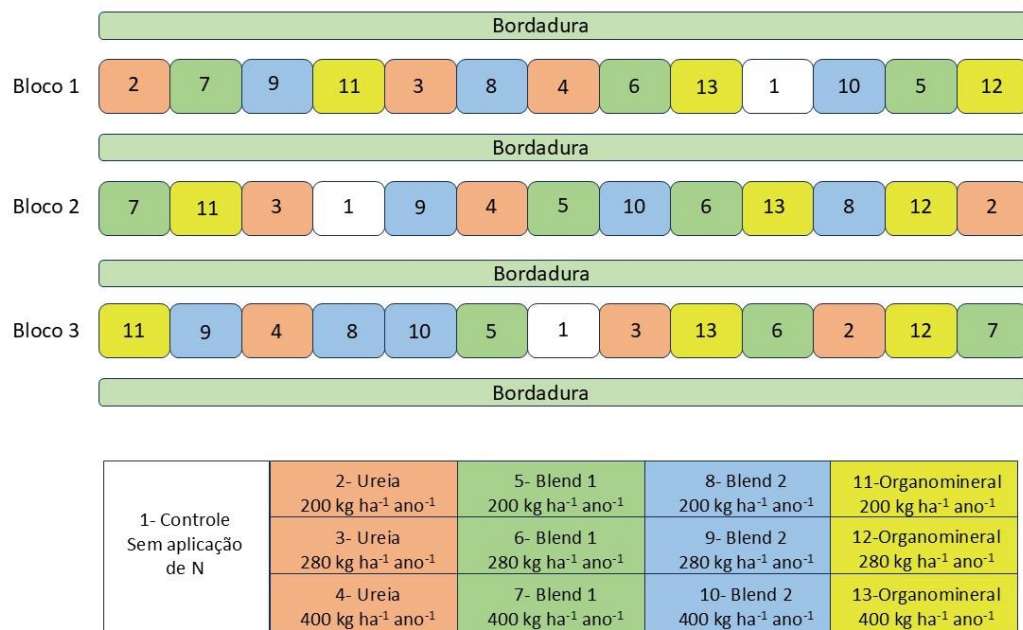
Argila	g/kg	724.2	723	757.6	756.4	756.4	793.3
N-total	g/kg	2,1	2,5	2,3	2,2	1,7	1,5
Densidade do solo	g/cm <sup>3</sup>	1,16	1,38	1,42	1,38	1,21	1,26

Nota: pH em água; P, K, Fe, Zn, Mn e Cu = Extrator Mehlich 1; S = extrator fosfato de cálcio; Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> = Extrator KCl (1mol L<sup>-1</sup>); H+Al = extrator SMP; B = extrator CaCl<sub>2</sub>; P-rem = fósforo remanescente; Sat. Al = Saturação por alumínio; Sat. Bases = Saturação por bases

### 3.4 Delineamento experimental

O delineamento foi em blocos casualizados em esquema fatorial (4x3+1), composto por 3 doses de nitrogênio, 4 fertilizantes nitrogenados e um tratamento controle (sem N), com três repetições, somando-se 13 tratamentos e totalizando 39 parcelas. A parcela experimental foi composta por 20 plantas, utilizando-se as 14 centrais como plantas úteis para as avaliações desejadas e as 3 plantas dispostas no início e no final de cada parcela foram utilizadas como bordaduras. As repetições (blocos) foram dispostas em linhas de cultivo alternadas, de forma que uma linha era utilizada para implantação das parcelas experimentais e a linha paralela utilizada como bordadura, com o objetivo de minimizar a interferência da adubação entre os blocos.

Figura 13. Croqui e delineamento experimental para realização das avaliações de campo.



Foram definidas as doses de 400 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, 280 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 200 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Os fertilizantes escolhidos para a condução do estudo foram a ureia convencional, um fertilizante organomineral e dois blends, compostos por fertilizantes de liberação controlada

(CRF, sigla em inglês para *controlled release fertilizers*, ou fertilizantes de liberação controlada) e ureia com inibidores de urease. A descrição detalhada das fontes será apresentada no tópico 3.4.

### 3.5 Condução do experimento

Toda a área experimental passou por calagem e gessagem de manutenção, além de uma adubação de base. A aplicação do calcário e do gesso aconteceu 4 meses antes do início do experimento, apenas na safra 22/23, com aplicação de 1,7 toneladas por hectare de calcário e 920 kg por hectare de gesso, conforme padrão adotado pela fazenda.

A adubação de base contou com aplicação de 350 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (cloreto de potássio com 60% de K<sub>2</sub>O, aplicado de maneira parcelada a cada adubação), 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (super fosfato triplo, com 46% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 300 kg ha<sup>-1</sup> de MgO, 5 kg ha<sup>-1</sup> de B (fonte Produbor® com 10% de B) e 8 kg ha<sup>-1</sup> de Zn (fonte Zincodur® com 18,5% de Zn).

As recomendações de manejo para pragas, doenças e plantas daninhas também ocorreram com base nos protocolos da propriedade.

As adubações nitrogenadas foram realizadas manualmente e parceladas em 3 aplicações para a ureia, sendo as demais fontes aplicadas em dose única, na primeira adubação. Na safra 22/23, as adubações aconteceram em 23/10/2022, 09/12/2022 e 25/01/2023 e a colheita em 07 e 08/07/2023. Para a safra 23/24, as adubações ocorreram em 12/11/2023, 27/12/2023 e 16/02/2024 e a colheita em 28 e 29/05/2024.

### 3.6 Monitoramento das condições climáticas do experimento em condições de campo

Os dados climáticos de temperatura, umidade relativa e precipitação foram obtidos da tabela de dados da estação de Oliveira – MG, por meio do portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). A estação de Oliveira fica localizada a 40 km da Fazenda Samambaia e é a estação automática mais próxima da propriedade, a qual realiza os registros a cada hora.

### 3.7 Quantificação das perdas por volatilização de amônia (NH<sub>3</sub>)

As perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH<sub>3</sub>) foram quantificadas por meio coletores semiabertos de amônia, inseridos nas linhas de adubação, conforme descrito por LARA CABEZAS et al (1999), nas parcelas experimentais cuja dose adotada era de 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N.

Os coletores semiabertos foram confeccionados em tubos de policloreto de vinila (PVC), com dimensões de 50 cm de altura e 20 cm de diâmetro. No solo, foram fixadas bases do mesmo material para encaixe do coletor. Os coletores foram cobertos com uma proteção de plástico com diâmetro maior do que o coletor, visando evitar entrada de algum agente externo e, ao mesmo tempo, permitir a entrada de ar na câmara.

Figura 14. Coletores semiabertos e bases instalados no campo para coleta do nitrogênio volatilizado (A) e detalhe da base após a adubação (B).



Fonte: Da autora, 2024.

Três bases foram fixadas em cada parcela. Dentro das bases foi aplicada a quantidade de fertilizante equivalente à área dessa base e correspondente à dose do tratamento em questão. A cada coleta, o coletor era trocado de base para que todas recebessem as mesmas condições de umidade, temperatura e precipitação ao longo do tempo.

Para capturar a amônia volatilizada, foi inserida dentro do coletor a uma altura de 30 cm do solo, uma esponja de  $0,02 \text{ g cm}^{-3}$  de densidade, 20 cm de diâmetro e 2 cm de espessura, embebida em ácido fosfórico ( $60 \text{ mL L}^{-1}$ ) e glicerina ( $50 \text{ mL L}^{-1}$ ). A cada coleta, a esponja era recolhida do campo e levada ao laboratório para extração, e uma nova esponja embebida em solução de glicerina e ácido fosfórico era inserida no coletor, trocando-se a base. As coletas foram realizadas periodicamente, conforme o cronograma da tabela 2.

Tabela 2. Cronograma de coletas das esponjas para quantificação da volatilização de amônia.

Safra	Adubação	Data de coleta das esponjas (em dias após adubação)
22/23	1°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 21, 28 e 47.
	2°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 13, 15, 21, 30, 47.
	3°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 21, 32 e 51
23/24	1°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 21, 28 e 45.
	2°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 21, 30, 51.
	3°	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 21, 30 e 47.

Fonte: Da autora (2024)

No laboratório, a solução contida na esponja com o  $\text{N-NH}_3$  capturado foi extraída em funil de Buchner, borrifando-se oito vezes a quantia de 50 mL de água destilada sobre a esponja e extraíndo com o auxílio de uma bomba de vácuo. Após extração, alíquotas de 20 ml foram reservadas para determinação do teor de N pelo método Kjeldahl. O resultado foi extrapolado a  $\text{kg ha}^{-1}$  e a percentagem de  $\text{N-NH}_3$  em relação à dose de  $400 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . A perda acumulada resultante foi obtida pela soma das perdas diárias até a última coleta e também expressa nas mesmas unidades.

### 3.8 Quantificação das emissões de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ )

Os fluxos de emissão de óxido nitroso foram mensurados conforme metodologia adotada por Sarkis et al. (2023b), adaptada de Alves et al. (2012). Para a quantificação dos fluxos de emissão de óxido nitroso, foi instalada 1 base de metal na projeção da copa do cafeeiro, nas parcelas controle e nas parcelas com aplicação de  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N.

As bases mediam  $35 \times 52$  centímetros, foram fixadas a cerca de 5 centímetros de profundidade no solo e possuíam uma calha em torno de 2 centímetros de largura que tinha a finalidade de sustentar e vedar as bordas da câmara coletora. Dentro do perímetro definido por cada base, foram aplicados  $2,42 \text{ g base}^{-1}$  aplicação $^{-1}$  de N, sendo que, para os blends e para o

fertilizante organomineral, a quantidade correspondente aos 3 parcelamentos foi aplicada em dose única, visto que as adubações destas fontes não foram parceladas, diferente da ureia. Nas parcelas com tratamento controle, não foi realizada adubação nitrogenada.

As câmaras eram compostas por caixas de PVC retangulares, equipadas com um furo no centro, na qual foi instalada uma mangueira e uma válvula plástica de 3 vias. A cada coleta, a câmara era encaixada na base metálica, a seringa era acoplada na válvula e então, capturava-se o gás contido no interior da câmara.

As coletas ocorreram entre outubro de 2022 e fevereiro de 2023, sendo realizadas nos primeiros dias após a adubação ou após registros isolados de precipitação ao longo da safra, que promoviam aumento do fluxo de  $N_2O$ .

Figura 15. Esquema das câmaras instaladas no campo para coleta de óxido nitroso.



Fonte: Da autora, 2024.

As coletas eram realizadas manualmente, pela manhã, totalizando 4 amostras por câmara, sendo a primeira coleta realizada imediatamente após o fechamento da câmara (tempo = 0) e as demais em intervalos de 20 minutos ( $t = 20 \text{ min.}$ ;  $t = 40 \text{ min.}$ ;  $t = 60 \text{ min.}$ ).

O conteúdo era posteriormente transferido para frascos de vidro em laboratório e analisados por cromatógrafo gasoso Shimadzu GC 2014, equipado com detectores de captura de elétrons para  $N_2O$ . Os fluxos foram mensurados pela quantidade acumulada diária de  $N_2O$  capturada e o fator de emissão calculado com base na fórmula:

$$FE = \frac{(N_2O \text{ trat} - N_2O \text{ Controle})}{(N \text{ Total})}$$

FE = fator de emissão

$N_2O \text{ trat}$  = emissão total de  $N_2O$  de cada fertilizante

$N_2O \text{ controle}$  = emissão total de  $N_2O$  do controle

$N_{\text{total}} = N_{\text{aplicado como fertilizante}}$

O fator de emissão corresponde à porcentagem de N do fertilizante aplicado que é convertido em emissões de  $N_2O$ . É calculado a partir da diferença de emissão entre um solo que recebeu adubação nitrogenada em relação a um solo não fertilizado, estando ambos nas mesmas condições (SHCHERBAK, MILLAR E ROBERTSON, 2014). Segundo o IPCC (2006), o valor padrão para o fator de emissão é de 1% do N aplicado, apesar de haver variações quanto ao manejo utilizado e condições ambientais.

### 3.9 Teores foliares de N

As amostragens foliares ocorreram quando os grãos atingiram o estágio de “chumbinho”. Em cada planta da parcela útil, foram coletados 2 pares de folhas saudáveis e sem sinais de deficiência nutricional, em dois lados opostos, totalizando 4 folhas por planta e 56 folhas por parcela. Coletaram-se o 3º e o 4º pares de folhas de ramos plagiotrópicos situados no terço médio das plantas, conforme QUAGGIO et al (2022).

As folhas foram acondicionadas em sacos de papel e levadas à estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até atingirem peso constante, e posteriormente, o material foi moído em moinho tipo Wiley de aço inox. As amostras foram digeridas por digestão sulfúrica e a determinação do teor de N foi realizada pelo método Kjeldahl (EMBRAPA, 2000). Os resultados foram expressos em  $g\ kg^{-1}$  e em  $dag\ kg^{-1}$ .

### 3.10 Produtividade e rendimento

A colheita foi realizada manualmente, tendo início quando aproximadamente 90% dos frutos apresentavam sua maturação entre os estádios cereja e passa. A produção da parcela útil foi quantificada em litros de café colhido, considerando-se grãos verdes, cerejas, passas e secos. Após a colheita, amostras de 3 L de café por parcela útil foram secas em terreiro até atingir cerca de 11% de umidade. A partir da amostra seca (café em coco), foi realizado o beneficiamento para separação de grãos e cascas, e o peso dos grãos beneficiados foi corrigido para a umidade de 12 %, tomada como referência. A produtividade foi determinada em  $kg\ ha^{-1}$  e o cálculo pode ser resumido pela fórmula:

$$\text{Produtividade (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Pb} \times \text{Vt} \times \text{Nph}}{\text{Npp} \times 1000 \times \text{Vc}}$$

Onde:

Pb = Peso do café beneficiado, a 12% de umidade (em gramas, g)

Vt = Volume total colhido em cada parcela (em litros, L)

Nph = Número de plantas por hectare

Npp = Número de plantas por parcela útil

Vc = Volume colhido para beneficiamento (em litros, L)

O rendimento foi calculado pela relação entre a quantidade, em litros de café colhidos (L), antes de passar pela etapa de beneficiamento, necessária para se produzir uma saca de 60 kg de café beneficiado, através da fórmula:

$$\text{Rendimento (em Litros saca}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Vt} \times \text{Nph}}{\text{Npp} \times \text{P}}$$

Onde:

Vt = Volume total colhido em cada parcela (em litros, L)

Nph = Número de plantas por hectare

Npp = Número de plantas por parcela

P = Produtividade (em sacas por hectare, sacas ha<sup>-1</sup>)

### 3.11 Exportação de N nos grãos e cascas

A exportação de nitrogênio pelos grãos e pelas cascas foi determinada após a secagem natural das amostras, separando-se grãos e cascas na etapa de beneficiamento.

As amostras foram moídas em moinho tipo Wiley de aço inox e submetidas à digestão sulfúrica. A determinação dos teores de N nos grãos e cascas foi realizada pelo método Kjeldahl, conforme descrito pela EMBRAPA (2000).

Para o cálculo da quantidade de N exportada pelos grãos, foi levado em consideração a produtividade dos tratamentos (dada em kg ha<sup>-1</sup>) e os teores de N encontrados (dado em g kg<sup>-1</sup>), divididos por 1000 para obtenção do valor em kg ha<sup>-1</sup>.

Para a determinação da exportação de N pelas cascas, considerou-se uma relação aproximada de 1:1 entre o peso dos grãos beneficiados e o peso das cascas, ou seja, cada 1 kg de café beneficiado gerou 1 kg de cascas. Essa relação foi obtida através da diferença entre o peso do café em coco e o peso do café beneficiado, resultando no peso de cascas produzidas em cada tratamento. Dessa maneira, para o cálculo da quantidade de N exportada pelas cascas, multiplicou-se o teor de N nas cascas (dado em  $\text{g kg}^{-1}$ ) pela produtividade dos tratamentos (dada em  $\text{kg ha}^{-1}$ ), divididos por 1000 para obtenção do valor em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

### 3.12 Classificação dos grãos por peneiras

Segundo a Instrução Normativa 08/2003 que trata sobre o Regulamento Técnico de Identidade e de Qualidade para a Classificação do Café Beneficiado em Grão Cru, os grãos podem ser classificados de acordo com o tamanho e formato, com base na porcentagem de grãos retidos nas peneiras com diferentes tamanhos de crivos (BRASIL, 2003). Não foram adotadas repetições para avaliação da classificação física, visto que o intuito era apenas a caracterização das amostras.

Após secagem e beneficiamento, os grãos verdes foram classificados segundo o seu formato e granulometria. Foram utilizadas amostras de 100 g após separação dos defeitos e impurezas, as quais passaram pelo conjunto de peneiras.

De acordo com a peneira que os retem, os grãos podem ser classificados como:

**Chato graúdo:** peneiras 19 a 17

**Chato médio:** peneiras 16 e 15

**Chato miúdo:** peneiras 14 ou menores

**Moca graúdo:** peneiras 13 a 11

**Moca médio:** peneira 10

**Moca miúdo:** peneira 9 ou menor.

Após a passagem pelas peneiras, foi realizada a pesagem da quantidade de grãos retidos em cada peneira e determinado o percentual retido nas peneiras 19, 18, 17, 16, 15, 14, além dos grãos moca retidos nas peneiras 11, 10, 9 e o fundo.

### 3.13 Caracterização sensorial dos cafés

A fim de caracterizar a qualidade da bebida advinda dos cafés que receberam as diferentes fontes e doses de N implementados no experimento, foi realizada a análise sensorial, popularmente conhecida como “prova de xícara”. A análise sensorial foi realizada a partir de amostras simples, que eram compostas por 1,3 L de cafés no estágio cereja, colhidos em cada bloco e tratamento, totalizando 3 amostras simples. As mesmas foram misturadas e transformadas em uma amostra composta única para cada fertilizante e dose, totalizando 13 amostras. Não foram adotadas repetições, visto que o intuito era apenas a caracterização do perfil de qualidade da bebida.

As amostras passaram pelo processo de secagem natural em terreiro, em sacos de rede plástica, os quais eram colocados ao sol e invertidos ao longo do dia para que a secagem ocorresse de maneira uniforme. Após secos, os frutos foram beneficiados e os grãos encaminhados para 3 provadores certificados (*Q-graders*), os quais realizaram a análise sensorial adotando-se o protocolo proposto pela *Specialty Coffee Association Of America* (SCAA, 2008) e pontuaram as amostras de acordo com os seguintes atributos: fragrância/aroma, uniformidade, ausência de defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, finalização, equilíbrio e final.

O resultado foi dado em pontos, os quais podem variar de 0 a 100, sendo que um café é considerado especial quando sua pontuação é superior a 80 pontos, podendo ser descrito como muito bom (entre 80 e 84,99), excelente (85 a 89,99) e exemplar (90 a 100) de acordo com sua pontuação (SCAA, 2008).

#### 4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As análises estatísticas foram realizadas empregando-se o software AgroR Shiny App (SHIMIZU, MARUBAYASHI E GONÇALVES, 2024). Os dados referentes às perdas de N por volatilização, emissões de óxido nitroso, teores foliares, exportação de N nos grãos e cascas, produtividade e rendimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA), após verificação da homogeneidade pelo teste de Bartlett e da normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para a variável “perdas de N por volatilização”, quando apresentou diferença significativa ( $p < 0,05$ ) para o fator isolado “fonte”, aplicou-se o teste de médias Skott-Knott a 5% de significância. Para a variável “emissões de óxido nitroso”, que apresentou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para o fator isolado fonte, aplicou-se o teste Tukey a 5% de significância. Já a variável “teores foliares”, significativa para o fator isolado doses de N, foi analisada por

regressão, ajustando-se modelos específicos para cada safra: linear para 22/23 e quadrático para 23/24, incluindo seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ).

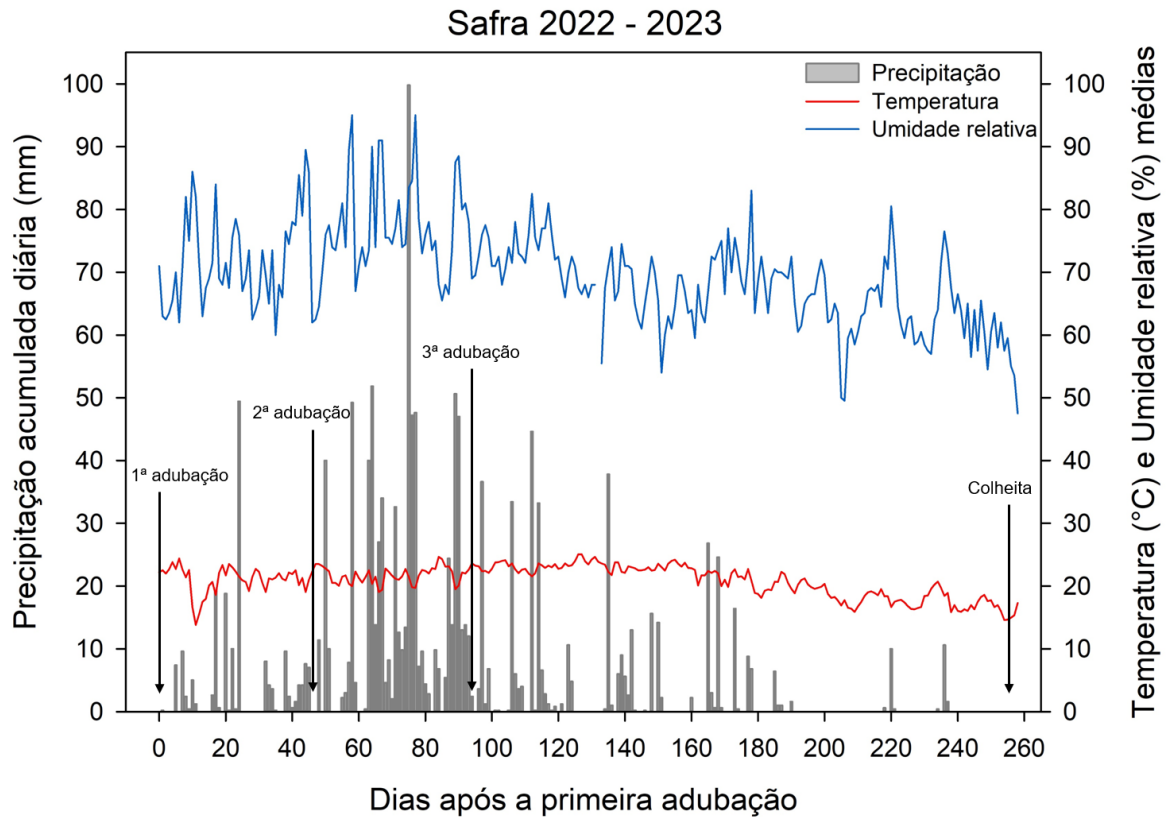
Os modelos utilizados para ajustar as curvas de liberação de nitrogênio pelos fertilizantes variaram conforme o teste e a fonte. No teste de laboratório, adotou-se o modelo hiperbólico para o fertilizante organomineral e o logarítmico para os blends 1 e 2. No ensaio de campo, o modelo exponencial proporcionou melhor ajuste para o organomineral, enquanto o modelo logarítmico foi mais adequado para o blend 1, em ambas as safras. Para o blend 2, o modelo logarítmico foi o mais indicado na safra 22/23, enquanto o modelo exponencial apresentou melhor ajuste na safra 23/24. As representações gráficas foram elaboradas por meio do software SigmaPlot (versão 12.5).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Condições climáticas nas safras 22/23 e 23/24**

A safra 2022 – 2023 foi marcada por temperaturas médias variando de 13,8°C a 25°C e a umidade relativa do ar entre 47,5 e 95%. Os dez dias anteriores à primeira adubação registraram uma precipitação acumulada de 27 mm. Durante o período de avaliação, que compreende desde a data da primeira adubação nitrogenada da safra até a colheita, a precipitação acumulada foi de 1410 milímetros de chuva em 258 dias, sendo 181 mm acumulados entre a primeira e segunda adubações (47 dias), 796 mm acumulados entre segunda e terceira adubações (47 dias) e 434 mm entre a terceira adubação e a colheita (164 dias). Os maiores acúmulos de precipitação ocorreram entre os meses de novembro a fevereiro, característica típica do clima da região em questão.

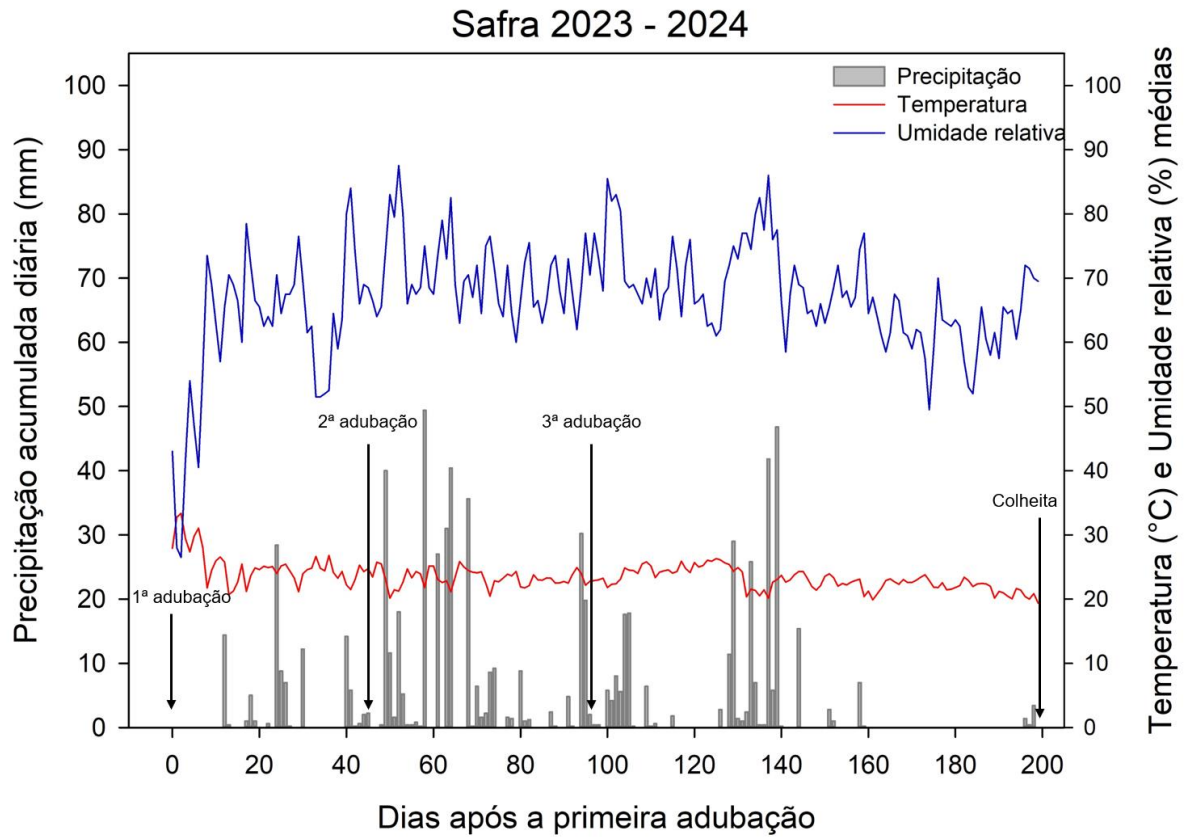
Figura 16. Precipitação acumulada (mm), temperatura (°C) e umidade relativa (%) em função dos dias após a primeira adubação da safra 22/23.



Fonte: Da autora, 2024.

Já a safra 2023 – 2024 foi caracterizada por períodos de veranicos com ondas de calor extremas, apresentando altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar. As médias de temperatura variaram de 19,3°C a 33,3°C e a umidade relativa de 26,5 a 87,5%. Os dez dias que antecederam a primeira adubação acumularam 27 mm de chuva. Para o período avaliado, ou seja, da primeira adubação até a colheita da safra, transcorreram 199 dias, nos quais foram registrados 745 milímetros de chuva acumulados. Deste volume total, 104 mm entre a primeira e segunda adubações (45 dias), 363,8 mm entre a segunda e terceira adubações (51 dias) e 276,8 mm entre a terceira adubação e a colheita (103 dias).

Figura 17. Precipitação acumulada (mm), temperatura (°C) e umidade relativa (%) em função dos dias após a primeira adubação da safra 23/24.



Fonte: Da autora, 2024.

A tabela 3 tem valores específicos da distribuição pluviométrica nos 10 primeiros dias após a primeira adubação de cada safra.

Tabela 3. Precipitação registrada nos 10 primeiros dias após cada parcelamento da adubação nitrogenada, nas safras 22/23 e 23/24

Parcelamento da adubação <sup>1</sup>	Precipitação (mm)													
	Dias após adubação					$\Sigma$ 1-5 dias	Dias após adubação					$\Sigma$ 6-10 dias	$\Sigma$ 1-10 dias	$\Sigma$ total acumulado <sup>2</sup>
	1	2	3	4	5		6	7	8	9	10			
Safra 2022 - 2023														
1°	0,2	0	0	0	7,4	7,6	0	9,6	2,4	0,4	5	17,4	25	180,6
2°	11,4	0	40	10	0	61,4	0	0	2,2	3	7,8	13	74,4	796
3°	0	3,6	36,6	1,2	6,8	48,2	0	0,2	0,2	0	0	0,4	48,6	433,6
Total	11,6	3,6	76,6	11,2	14,2	117,2	0	9,8	4,8	3,4	12,8	30,8	148	1410,2
Safra 2023 - 2024														
1°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
2°	0	0	0,4	40	11,6	52	1,6	18	5,2	0,4	0,4	25,6	77,6	363,8
3°	0,4	0,4	0	5,8	4,2	10,8	8	5,6	17,6	17,8	0,2	49,2	60	276,8
Total	0,4	0,4	0,4	45,8	15,8	62,8	9,6	23,6	22,8	18,2	0,6	74,8	137,6	744,6

Nota: <sup>1</sup> parcelamento da adubação apenas para ureia convencional. <sup>2</sup> o somatório total acumulado compreende a soma do volume precipitado entre duas adubações, com exceção do terceiro parcelamento, o qual compreende o regime acumulado de chuvas entre a data da terceira adubação e a data de colheita, em cada safra.

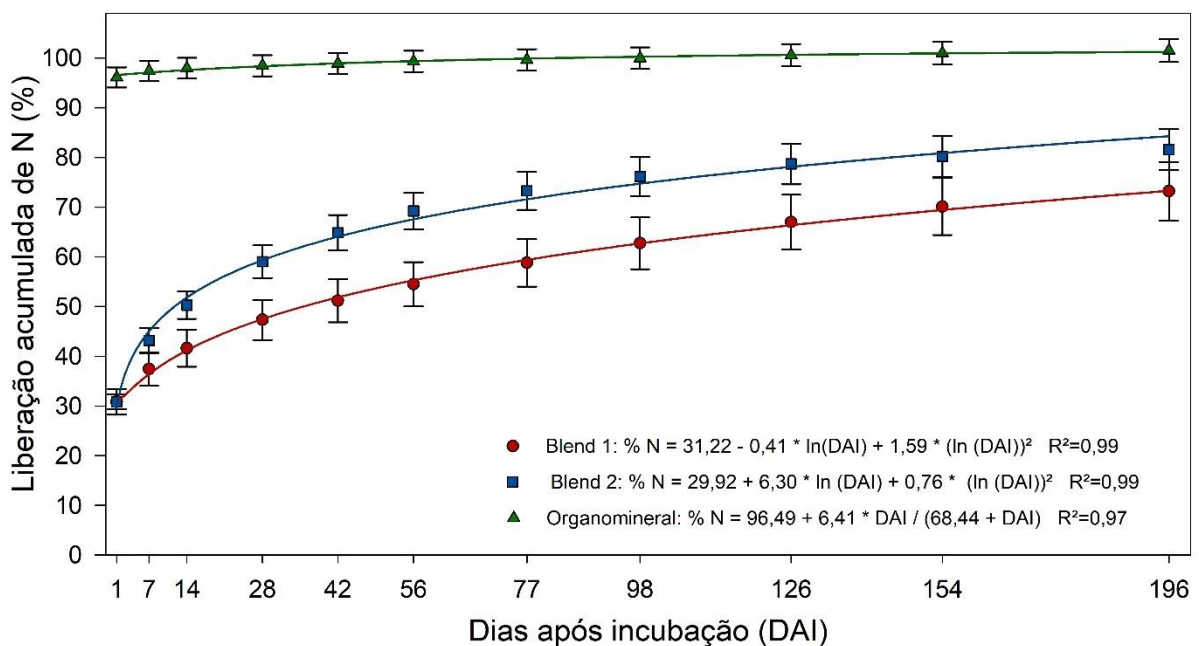
O primeiro parcelamento da adubação da safra 2022 – 2023 registrou um acúmulo de 25 mm de chuva nos 10 primeiros dias após a adubação. Em contrapartida, para o mesmo período na safra 2023 – 2024 não houve registros de precipitação. Aos 10 dias após a segunda adubação, os registros de precipitação foram similares para ambas as safras, sendo acumulados 74,4 mm na safra 2022 – 2023 e 77,6 mm na safra 2023 – 2024. Para o último parcelamento da adubação, o acúmulo de chuvas registrado foi de 48,6 mm e 60 mm para as safras 2022 – 2023 e 2023 – 2024, respectivamente.

## 5.2 Liberação de nitrogênio pelos fertilizantes

### 5.2.1. Laboratório

Para o teste de liberação de nitrogênio conduzido a 21°C em laboratório, o fertilizante organomineral apresentou um ajuste hiperbólico, enquanto os blends 1 e 2 apresentaram um ajuste logarítmico. As equações de regressão estimadas com base nos modelos ajustados e as curvas de liberação acumulada de nitrogênio, em função dos dias de incubação do experimento, estão na figura 18.

Figura 18. Porcentagem acumulada de N liberado pelos fertilizantes em condições controladas, a 21°C, em função dos dias de incubação. (%N = liberação de nitrogênio acumulada (%); DAI = Dias após incubação).



Fonte: Da autora, 2024.

Um dia após a incubação dos fertilizantes, o fertilizante organomineral apresentou a maior taxa de liberação acumulada, atingindo 96,58% de nitrogênio liberado em 24 h. Para os fertilizantes blend 1 e blend 2 a taxa de liberação de nitrogênio foi de 31,22% e 29,92% no mesmo período de tempo. A taxa de liberação inicial, nas primeiras 24 horas, é reflexo das frações de alta solubilidade contida nos blends e, sobretudo, no organomineral cuja fonte não possui revestimento para controlar a permeabilidade de água nos grânulos de ureia. Aos 7 dias, blend 1, blend 2 e organomineral liberaram 36%, 45% e 97% de nitrogênio, respectivamente.

Os três parcelamentos das adubações em campo ocorreram, em média, em intervalos de 45 dias. Avaliando o resultado obtido em laboratório, nota-se que, aos 45 dias após a incubação, momento em que, no campo, ocorreu o segundo parcelamento da adubação, o fertilizante organomineral já havia liberado 99,03%, enquanto os blends 1 e 2 liberaram 52,7% e 64,91%.

Aos 90 dias, momento em que foi realizada a terceira adubação com ureia convencional no campo, o fertilizante organomineral já havia atingido 100% de liberação de N em laboratório, não havendo mais nitrogênio disponível para ser liberado posteriormente para a cultura. No mesmo período, o blend 1 havia liberado 62% de nitrogênio e 74% para o blend 2, ou seja, ainda restavam 38% e 26% do N para ser liberado.

Ao final de 196 dias de avaliações, a liberação acumulada de nitrogênio para blend 1 e blend 2 foi de 73% e 84%, respectivamente. O blend 2 atingiu uma taxa de 75% de liberação aos 100 dias após o início do experimento.

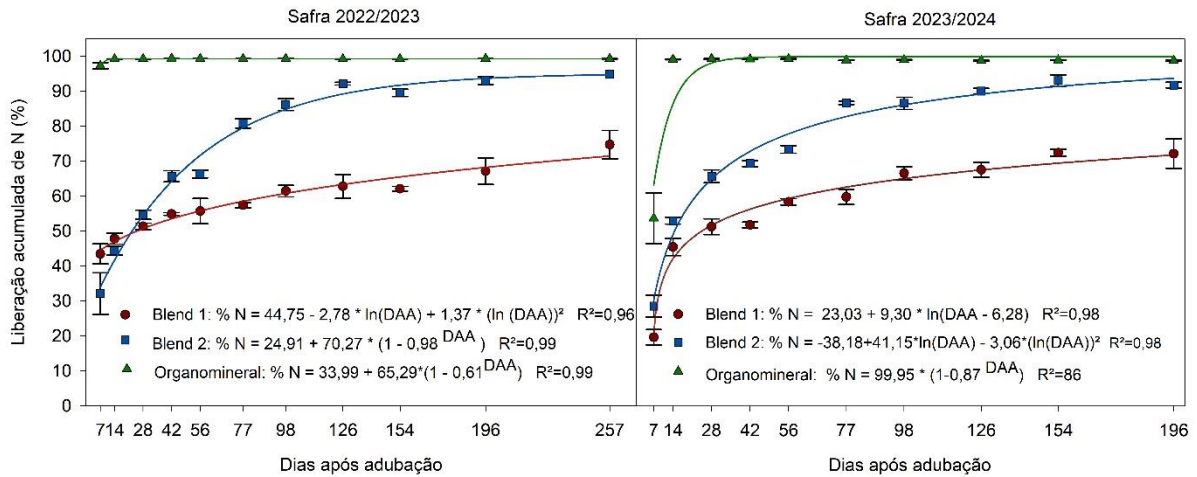
## **5.2.2. Liberação de N dos fertilizantes em condições de campo**

### **5.2.2.1. Safra 22/23**

O comportamento de liberação de nitrogênio para os blends 1 e 2 e organomineral, em condições de campo para as safras 22/23 e 23/24 está representado na figura 19, acompanhado das equações de regressão ajustadas.

Para o fertilizante organomineral, as curvas seguiram um ajuste exponencial e para o blend 1 um ajuste logarítmico, para ambas as safras. Para o blend 2, houve um ajuste logarítmico para a safra 22/23 e um ajuste exponencial para a safra 23/24.

Figura 19. Porcentagem acumulada de N liberado pelos fertilizantes em condições de campo, em função dos dias após a adubação, nas safras 22/23 e 23/24. (%N = liberação de nitrogênio acumulada (%); DAA = Dias após adubação).



Fonte: Da autora, 2024.

Durante a safra 22/23, aos 7 dias após o 1º parcelamento da adubação, observa-se que o fertilizante organomineral apresentava uma liberação acumulada de 97% de nitrogênio, enquanto o blend 1 e blend 2 haviam liberado 45% e 34% do nutriente ao solo.

Os três parcelamentos das adubações do experimento em campo ocorreram, em média, a cada 45 dias (aos 0, 45 e 90 dias). Considerando esses períodos, a liberação de nitrogênio acumulada do dia zero (1º parcelamento da adubação) até aos 45 dias, momento em que foi realizada a 2ª adubação, era de 54% para o blend 1, 67% para o blend 2 e 99% para o organomineral.

A partir da 2ª adubação, realizada aos 45 dias, até a ocorrência do 3º parcelamento, aos 90 dias, o blend 1 havia liberado 60% e o blend 2, 84% de N liberado. Da última adubação até 135 dias (45 dias após o último parcelamento da adubação), o blend 1 alcançou uma taxa de liberação de 64% e o blend 2, 91% de N liberado. Ao final de 257 dias, momento em que foi realizada a colheita da safra 22/23, a liberação acumulada de N para os blends 1 e 2 era de 72% e 95%. Considerando o período avaliado, o blend 2 atingiu 75% de liberação de N aos 62 dias. O teste realizado em laboratório resultou em valores bastante próximos aos que foram encontrados em campo para o blend 1, com 54% aos 45 dias (52,7% em laboratório), 60% aos

90 dias (62% em laboratório) e 68% aos 196 dias (73% em laboratório). Já o blend 2 apresentou resultados ligeiramente discrepantes quando comparados os testes de campo e laboratório: houve uma liberação acumulada de 67% do N aos 45 dias (64,9% em laboratório), 84% aos 90 dias (74% em laboratório) e 94% aos 196 dias (84% em laboratório). As diferenças encontradas estão associadas às condições climáticas variáveis a que estavam submetidos os fertilizantes no teste de campo e também a fatores ligados ao solo, como a presença de microrganismos.

#### **5.2.2.2. Safra 23/24**

Foi quantificada uma diferença no comportamento do fertilizante organomineral, na coleta realizada aos 7 dias após a adubação, ocasião na qual a fonte atingiu uma taxa de liberação de 62% de nitrogênio. Os blends 1 e 2 também apresentaram menor porcentagem de liberação no mesmo período em relação à safra anterior, atingindo 20% e 30% de liberação acumulada de N. A falta de umidade no solo, visto que não houve registros de precipitação nos 10 primeiros dias após a 1ª adubação, contrastando com os 25 mm de chuva registrados nos 10 dias iniciais na safra 22/23 pode explicar o comportamento observado.

Aos 45 dias, momento em que foi realizado o 2º parcelamento da adubação, os blends 1, blend 2 e o organomineral haviam liberado 57%, 74% e 100% de nitrogênio. Já aos 90 dias, foi realizada a 3ª adubação e os blends 1 e 2 acumulavam uma liberação de 64% e 85% de nitrogênio.

Ao final do período de avaliação, aos 196 dias, a taxa de liberação atingida pelas fontes foi de 72% para o blend 1 e 94% para o blend 2.

Na safra 22/23, o blend 2 atingiu 75% de liberação em torno de 62 dias, enquanto na safra 23/24, aos 48 dias. Ao final de 257 dias de avaliação na safra 22/23 e 196 dias na safra 23/24, o blend 1 ainda não havia alcançado 75% de liberação de N. Dessa maneira, o blend 1 apresentou maior efeito residual de N, seguido do blend 2. O fertilizante organomineral não apresenta efeito residual quando formado apenas por uma mistura física entre grânulos não revestidos de ureia e fração orgânica em pó.

Ao compararmos os valores de liberação acumulada de N do teste em laboratório com o teste de campo, foram obtidos os seguintes valores para o blend 1: 57% aos 45 dias (52,7% em laboratório), 64% aos 90 dias (62% em laboratório) e 72% aos 196 dias (73% em

laboratório). Já o blend 2 apresentou os seguintes resultados: houve uma liberação acumulada de 74% do N aos 45 dias (64,9% em laboratório), 85% aos 90 dias (74% em laboratório) e 94% aos 196 dias (84% em laboratório).

A diferença observada entre os blends estudados pode ser justificada pela composição da mistura. Cada blend varia suas proporções de grânulos com revestimento de maior ou menor espessura, resultando em diferentes padrões de liberação, onde fontes com maior proporção de ureia convencional resultam em uma liberação mais rápida em relação aos blends com maior proporção de grânulos revestidos, conforme resultados obtidos por Andrade et al. (2021). Além das proporções entre ureia não revestida e grânulos com revestimento ou estabilizados, a espessura, composição e a integridade do revestimento dos grânulos também podem afetar a taxa de liberação do nutriente, conforme estudado por Ghumman et al., 2022.

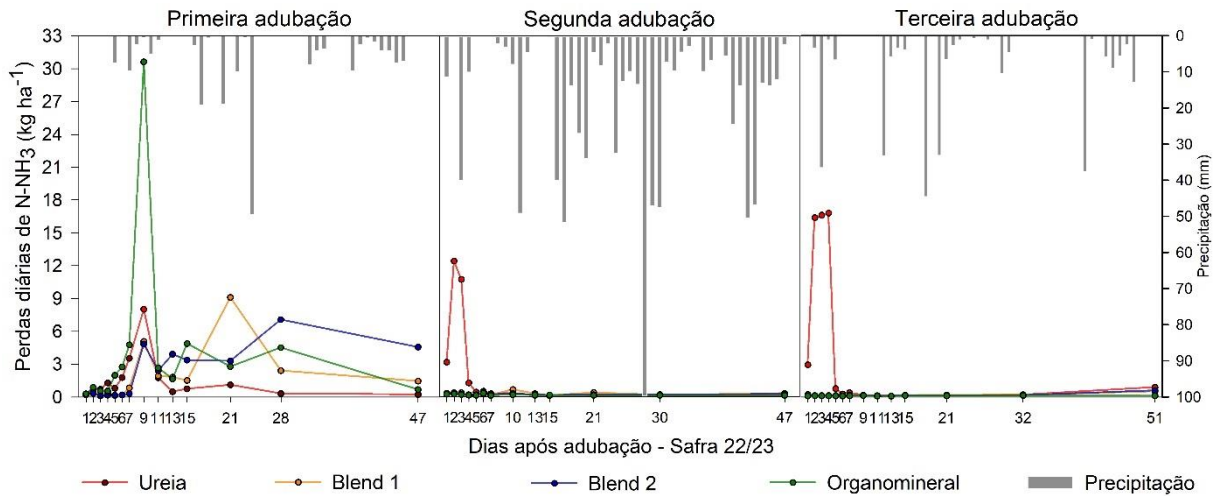
No caso do fertilizante organomineral, a fração orgânica não atua como uma barreira física eficiente para a permeabilidade de água, visto que não há formação de um revestimento coeso como nos fertilizantes revestidos, explicando sua rápida liberação do nutriente já nas primeiras 24h de avaliação. A falta de uniformidade e integridade do revestimento também influenciam diretamente na taxa de liberação (GHUMMAN et al., 2023; LIU et al., 2020).

### **5.3 Volatilização de amônia**

#### **5.3.1 Perdas diárias de N-NH<sub>3</sub>: Safra 22/23**

As perdas diárias e acumuladas de nitrogênio pela volatilização de amônia (N-NH<sub>3</sub>) foram influenciadas ( $p \leq 0.05$ ) pelas tecnologias para fertilizantes nitrogenados utilizadas na adubação do café. A figura 20 ilustra as perdas diárias e a precipitação acumulada nos três parcelamentos da adubação na safra 22/23.

Figura 20. Perdas diárias de N-NH<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) e precipitação acumulada (mm) registradas na safra 22/23, durante os três parcelamentos da adubação nitrogenada.



Fonte: Da autora, 2024.

O pico de volatilização de N-NH<sub>3</sub>, quando utilizada a ureia convencional, ocorreu aos 9, 2 e 4 dias após a 1ª, 2ª e 3ª adubações, totalizando perdas de 8, 12,4 e 16,8 kg ha<sup>-1</sup> de N nos dias de ocorrência do pico. Para o fertilizante organomineral, o pico ocorreu aos 9 dias após a primeira adubação, com perdas de 30,6 kg ha<sup>-1</sup> de N. Após o segundo e terceiros parcelamentos, as perdas diárias do fertilizante organomineral permaneceram inferiores a 0,29 kg ha<sup>-1</sup> até o final do período avaliado.

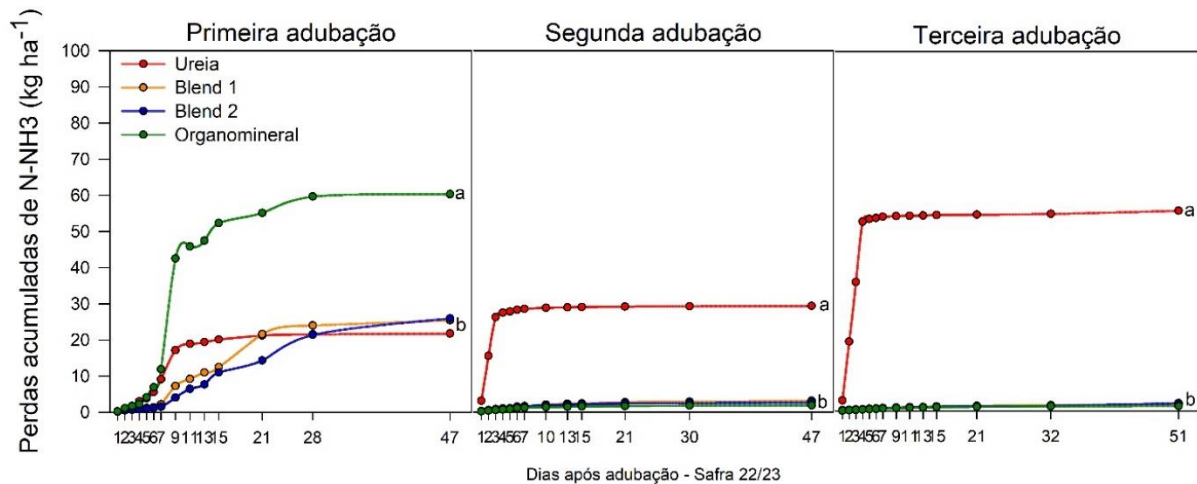
Analisando os resultados da volatilização de amônia das misturas, o blend 1 apresentou seu pico aos 9 dias após a primeira adubação, com perdas de 5,07 kg ha<sup>-1</sup>. O blend 2 também apresentou um pico de volatilização aos 9 dias, com perdas de 4,83 kg ha<sup>-1</sup>. O primeiro pico observado, tanto para o blend 1 quanto para o blend 2 tem origem nas frações sem revestimento contidas na mistura. A ocorrência dos picos de volatilização aos 9 dias pode ser explicada pela distribuição da precipitação nos dias anteriores ao pico. Durante os 4 primeiros dias, não houveram registros expressivos de precipitação na área. No 5º dia, foi registrado um volume de 7,4 mm de chuva, seguido por 0 mm de chuva aos 6 dias, 9,6 mm aos 7, 2,4 mm aos 8 e 0mm aos 9 dias. O acúmulo de 19,4 mm de chuva até o 9º dia foi responsável por umedecer o solo, mas não foi o suficiente para incorporar o fertilizante, o que deu condições para a hidrólise da ureia e, conseqüentemente, gerou perdas por volatilização. Isso se deve ao baixo volume precipitado aliado à interceptação de parte da chuva pela cultura, através de seus ramos e folhas. Em um estudo conduzido por Moura et al. (2014), os autores compararam a precipitação total numa área de café e a precipitação que efetivamente chega ao solo abaixo da copa das plantas.

Os autores encontraram valores de 69% para a precipitação abaixo da copa em relação à precipitação total registrada na área. Quando avaliados os eventos de precipitação por volume, os autores também observaram que chuvas abaixo de 5 mm levaram a uma precipitação interna que correspondia a 43,9% da precipitação total, e chuvas acima de 5 mm, o percentual de precipitação interna foi de 70,4. Além da precipitação e umidade do solo, outros fatores também podem levar à ocorrência de perdas por volatilização, como a forma de aplicação do fertilizante, fonte de nitrogênio utilizada, temperatura, pH, teor de matéria orgânica, capacidade de troca de cátions, poder tampão do solo (KASHYAP, CHOUDHARI E SINGH, 2019; LAWRENCE ET AL., 2021), além da atividade da enzima urease (KAFARSKI E TALMA, 2018).

### 5.3.2 Perdas acumuladas de N-NH<sub>3</sub>: Safra 22/23

As perdas acumuladas por parcelamento estão representadas na figura 21.

Figura 21. Perdas acumuladas de N-NH<sub>3</sub> (em kg ha<sup>-1</sup>) por parcelamento, para a safra 22/23. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

As perdas acumuladas ao final do 1º parcelamento da adubação seguiram a seguinte ordem decrescente: organomineral (60,3 kg ha<sup>-1</sup>) > blend 2 (25,9 kg ha<sup>-1</sup>) = blend 1 (25,5 kg ha<sup>-1</sup>) = ureia (21,8 kg ha<sup>-1</sup>). A maior perda acumulada registrada para o fertilizante organomineral foi devido a aplicação em dose única, sem parcelamentos, e por não conter tecnologias que permitissem um controle da liberação do N para o solo. Ao final do segundo parcelamento, as

perdas acumuladas seguiram a seguinte ordem decrescente: ureia ( $29,3 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > blend 1 ( $3,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ) = blend 2 ( $2,7 \text{ kg ha}^{-1}$ ) = organomineral ( $1,8 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Para o terceiro parcelamento, as perdas acumuladas seguiram a ordem decrescente: ureia ( $55,7 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > blend 1 ( $1,9 \text{ kg ha}^{-1}$ ) = blend 2 ( $2,2 \text{ kg ha}^{-1}$ ) = organomineral ( $1,4 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

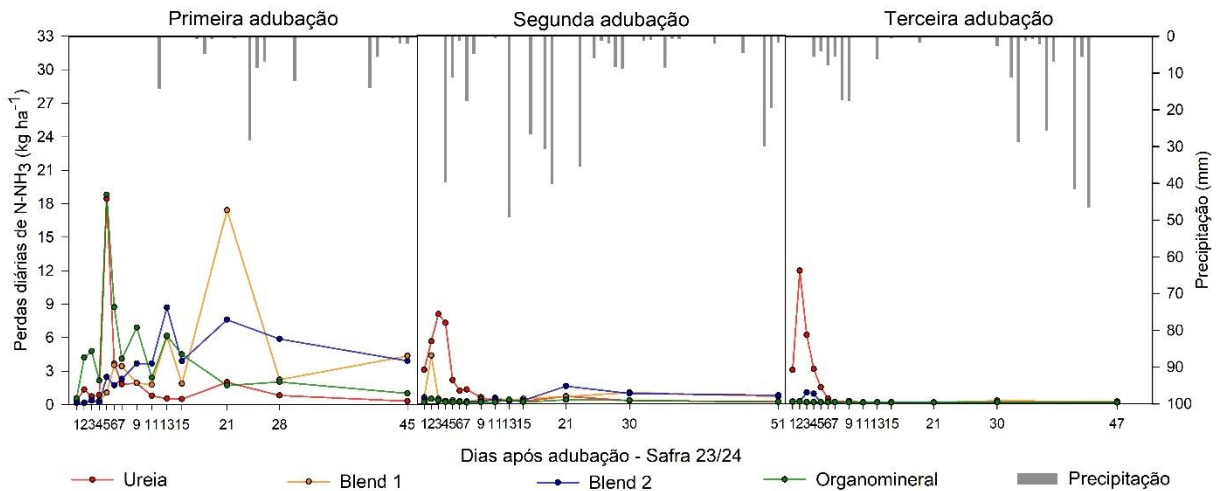
As perdas acumuladas totais para a safra 22/23 foram maiores para a ureia convencional ( $106,8 \text{ kg ha}^{-1}$ ), o que representou uma perda de 26,7% dos  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N. Em seguida, o fertilizante organomineral ( $63,6 \text{ kg ha}^{-1}$ ) com 15,9% do N perdido por volatilização. Os blends 1 e 2 não diferiram estatisticamente entre si e apresentaram as menores perdas acumuladas da safra, ( $30,8$  e  $30,6 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente), valores que correspondem a 7,7% e 7,65 para os blends 1 e 2.

O uso do fertilizante organomineral promoveu uma redução de 40,5% de perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação à ureia convencional, enquanto o blend 1 e blend 2 reduziram em 71,2 e 71,3% das perdas. As perdas podem ser influenciadas, conforme citado anteriormente, por uma série de fatores intrínsecos e extrínsecos ao solo. Em um estudo conduzido por Hernández López (2024) no mesmo talhão e período de avaliação adotado neste estudo, o autor registrou uma redução de perdas por volatilização de amônia de 16,7% para o organomineral aplicado em dose única e de 38,5% para o blend, em comparação à ureia convencional, valores inferiores aos que foram quantificados neste estudo.

### 5.3. 3 Perdas diárias de N-NH<sub>3</sub>: Safra 23/24

As perdas diárias e a precipitação acumulada nos três parcelamentos da adubação nitrogenada estão na figura 22.

Figura 22. Perdas diárias de N-NH<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) e precipitação acumulada (mm) registradas na safra 23/24, durante os três parcelamentos da adubação nitrogenada.



Fonte: Da autora, 2024.

O pico de volatilização da ureia convencional aconteceu aos 5 dias, com perda de 18,4 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>. Para os demais parcelamentos, foram registrados picos aos 3 dias após a segunda adubação (8,1 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>) e aos 2 dias após a terceira adubação (12,0 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>). Após a primeira adubação, o fertilizante organomineral apresentou seu pico de volatilização aos 5 dias, atingindo 18,81 kg ha<sup>-1</sup> de perdas. A partir do segundo e terceiro parcelamentos, as perdas diárias pelo fertilizante organomineral não ultrapassaram 0,47 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>.

O blend 1 teve seu pico de volatilização aos 6 dias após a primeira adubação, o que representou uma perda de 3,5 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>. O blend 2 apresentou seu pico de volatilização entre o 11º e 13º dias após a primeira adubação, registrando uma perda média de 4,35 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>. A fração dessas misturas (blends) composta por grânulos estabilizados, revestidos ou de liberação lenta é a responsável pelo atraso nas perdas e pela menor volatilização (GUELF, 2017). No caso dos grânulos revestidos, o atraso nas perdas e a menor volatilização podem variar de acordo com a natureza do revestimento, sua integridade e espessura (GHUMMAN ET AL., 2022), além da umidade, temperatura e precipitação pluviométrica (GUELF, 2017).

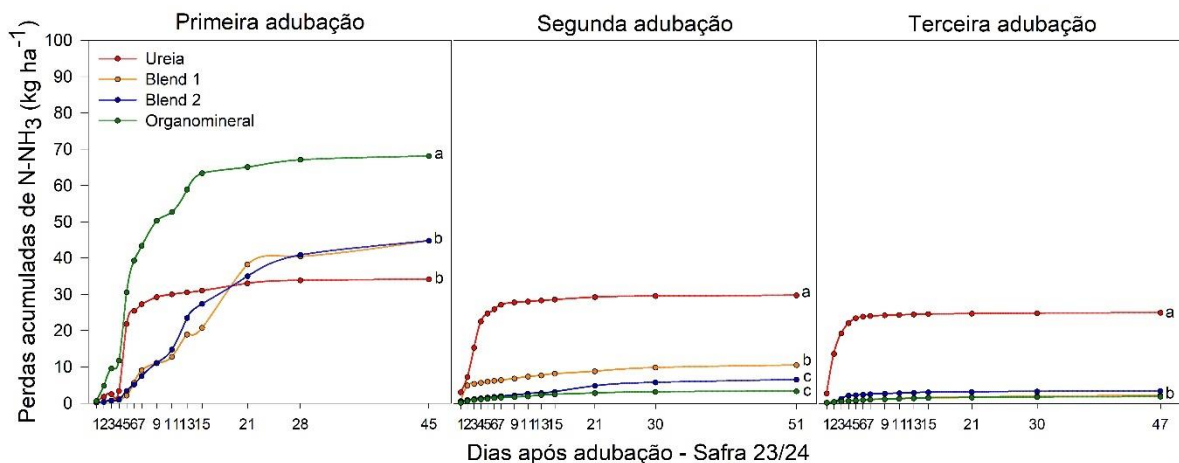
Ao analisarmos as perdas em cada pico, em kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>3</sub>, nota-se que a quantidade perdida pelos blends 1 (3,5 kg ha<sup>-1</sup>) e 2 (4,35 kg ha<sup>-1</sup>) corresponderam a 0,87% e 1,1% do N total aplicado. Para a ureia convencional (18,4 kg ha<sup>-1</sup>) e o organomineral (18,81 kg ha<sup>-1</sup>), a

perda durante o pico reduziu em 4,6% e 4,7% a disponibilidade do N total aplicado ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ). O uso de blends com diferentes tecnologias e espessuras de revestimento na composição mostrou-se eficiente na redução e no atraso das perdas por volatilização, conforme observado por outros autores (CHAGAS ET AL., 2016; FREITAS ET AL., 2023; HERNÁNDEZ LÓPEZ, 2024).

### 5.3.4 Perdas acumuladas de N-NH<sub>3</sub>: Safra 23/24

As perdas acumuladas por parcelamento estão representadas na figura 23.

Figura 23. Perdas acumuladas de N-NH<sub>3</sub> (em  $\text{kg ha}^{-1}$ ) por parcelamento, para a safra 23/24. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

As perdas acumuladas ao final da safra 23/24 obedeceram a seguinte ordem decrescente: ureia ( $91,3 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > organomineral ( $73,4 \text{ kg ha}^{-1}$ ) > blend 1 ( $57,6 \text{ kg ha}^{-1}$ ) = blend 2 ( $55,4 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Houve a maior perda acumulada para a ureia convencional ( $91,3 \text{ kg de N por ha}^{-1}$ ), representando 22,8% do N aplicado na adubação anual do cafeeiro, valor aproximado ao encontrado por Freitas et al. (2023) e Chagas et al., (2016), que registraram perdas para a ureia convencional de 25% e 18,5%, respectivamente. O fertilizante organomineral teve a segunda maior perda ( $73,4 \text{ kg de N por ha}^{-1}$  ou 18,3% do N aplicado). Os blends 1 e 2 não diferiram estatisticamente entre si, apresentando perdas de  $57,6 \text{ kg ha}^{-1}$  (14,4% do N aplicado) e  $55,0 \text{ kg}$

de N por ha<sup>-1</sup> (13,7% do N aplicado). O organomineral promoveu redução de 19,6% nas perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação à ureia, enquanto os blends 1 e 2 reduziram em 36,9% e 39,7%, comparativamente a ureia convencional.

Ao final de ambas as safras, nota-se que o comportamento em relação às perdas por volatilização de amônia foi semelhante, com perdas para ureia convencional (99,1 kg ha<sup>-1</sup>) > organomineral (68,5 kg ha<sup>-1</sup>) > blend 1 (44,2 kg ha<sup>-1</sup>) = blend 2 (42,8 kg ha<sup>-1</sup>) (tabela 4).

Tabela 4. Perdas médias acumuladas de N-NH<sub>3</sub> (kg ha<sup>-1</sup>) em diferentes fontes nitrogenadas, aplicadas em duas safras na espécie *Coffea arabica*.

Fertilizantes	Perdas acumuladas (kg de N por ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )		
	Safra 22/23	Safra 23/24	Média (duas safras)
Ureia	106,8 a	91,3 a	99,1
Organomineral	63,6 b	73,4 b	68,5
Blend 1	30,8 c	57,6 c	44,2
Blend 2	30,6 c	55,0 c	42,8
Coefficiente de variação (%)	21,4	13,4	-

Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Skott-Knott.

Ao analisar os resultados das duas safras, é importante considerar as diferenças quanto ao volume de precipitação registrado para cada ano e o perfil de distribuição. A safra 22/23 foi marcada por um cenário de chuvas isoladas e menos volumosas logo após o primeiro parcelamento, o que ocasionou maiores perdas por volatilização quando comparada à safra 23/24, onde não houve nenhum registro de precipitação nos 10 primeiros dias após a 1ª adubação. A baixa disponibilidade de água no solo reduz a velocidade de hidrólise da ureia, diminuindo as perdas por volatilização, o que explica as menores perdas da safra 23/24 em relação à safra 22/23.

Em relação a adoção dos blends para a adubação do café, foi possível observar redução significativa de perdas por volatilização nas duas safras em comparação ao organomineral e a ureia convencional. O desempenho satisfatório da tecnologia ficou ainda mais evidente quando analisamos os resultados da safra 22/23, onde houve redução de perdas em torno de 71% em relação à ureia convencional. A safra 23/24 também apresentou resultados satisfatórios, porém com valores inferiores à safra 22/23, devido ao menor volume de precipitação registrado e, conseqüentemente, menores perdas por volatilização da ureia convencional. A combinação em blends de grânulos de liberação controlada e estabilizados (a exemplo da ureia + NBPT) garantem maior intervalo de segurança entre a chegada das primeiras precipitações e a completa

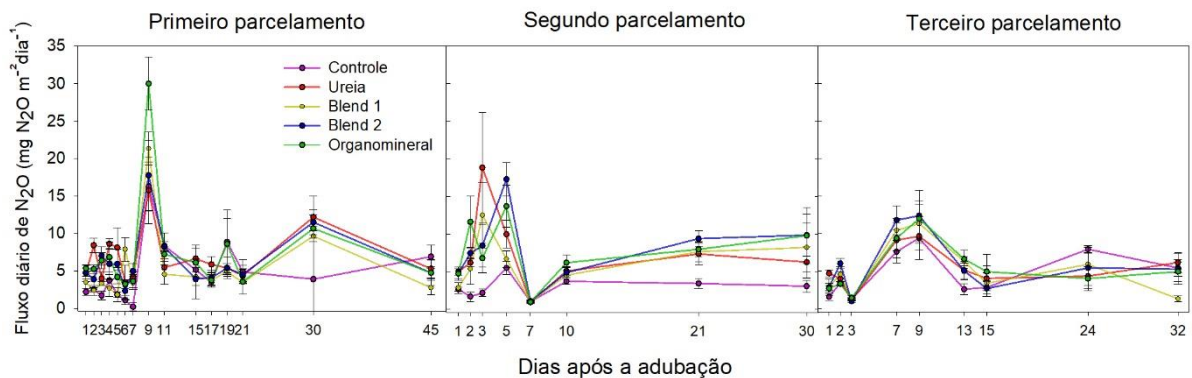
incorporação do grânulo ao solo, além de promoverem uma liberação gradual do nutriente ao longo do ciclo produtivo da cultura. conforme observado também por Chagas et al. (2016) e De Souza et al. (2023) em seus estudos conduzidos com a cultura do café. No presente trabalho, o revestimento contido nos fertilizantes de liberação controlada que compõem os blends atuou como barreira física à entrada de água no grânulo do fertilizante e, conseqüentemente, evitou a rápida hidrólise da ureia e sua conseqüente perda para a atmosfera na forma de  $\text{NH}_3$  (AZEEM, et al., 2014; JIANG et al., 2018; LIU et al., 2020), promovendo a liberação gradual do nutriente no solo.

## 5.4 Emissões de óxido nitroso: safra 22/23

### 5.4.1 Fluxos diários de $\text{N}_2\text{O}$

Os fluxos diários de  $\text{N}_2\text{O}$ , registrados para cada parcelamento, estão representados na figura 24.

Figura 24. Fluxo diário de  $\text{N}_2\text{O}$  (em  $\text{mg m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) após cada parcelamento da adubação nitrogenada, durante a safra 22/23.



Fonte: Da autora, 2024.

Durante o 1º parcelamento da adubação nitrogenada os fluxos diários de  $\text{N}_2\text{O}$  tiveram seu pico registrado aos 9 dias após a aplicação dos fertilizantes, onde foram contabilizados para o organomineral = 29,9  $\text{mg de N}_2\text{O m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ; para o blend 1 = 21,3  $\text{mg de N}_2\text{O m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ; para o blend 2 = 17,7  $\text{mg de N}_2\text{O m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ; para o controle 16,2  $\text{mg de N}_2\text{O m}^{-2} \text{dia}^{-1}$  e para a ureia

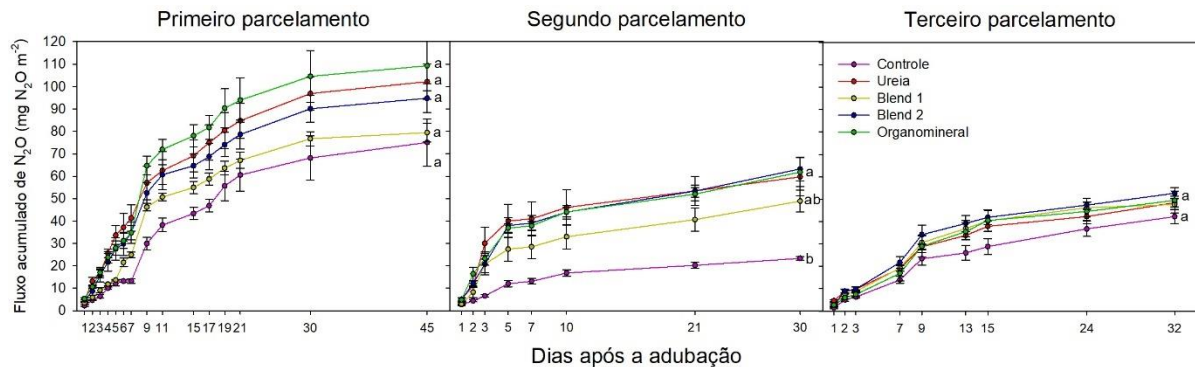
convencional 15,7 mg de  $N_2O$   $m^{-2}$   $dia^{-1}$ , sendo esta última aplicada em 3 parcelamentos, ou seja, esse valor representa a perda de  $N_2O$  referente a 1/3 do N aplicado na safra, por isso, as menores perdas para ureia comparada aos demais fertilizantes que foram aplicados em parcelamento único.

Este primeiro pico ocorreu em um momento em que no solo havia o acúmulo de 20 mm de precipitação, além da alta disponibilidade de N no solo, condição que favorece a emissão de  $N_2O$  (KAUR ET AL., 2023; DE CARVALHO, ALVES E PEREIRA, 2010). Todos os picos registrados nos fluxos de emissão de  $N_2O$  aconteceram após a ocorrência de chuvas. Após a 2ª adubação, o pico de emissão de  $N_2O$  pela ureia ocorreu aos 3 dias, momento em que a área havia acumulado 51,4 mm de precipitação e foram contabilizadas 18,8 mg de  $N_2O$   $m^{-2}$   $dia^{-1}$ . Aos 9 dias após a 3ª adubação, a ureia emitiu 9,7 mg de  $N_2O$   $m^{-2}$   $dia^{-1}$  após um acúmulo de 48,6 mm de precipitação. Além da ocorrência da precipitação pluviométrica, a intensidade das chuvas e a dose na adubação nitrogenada (dose alta, média ou baixa) também interferem nas emissões de  $N_2O$ , conforme estudado por Zhang et al. (2021b).

#### 5.4.2 Emissões acumuladas de $N_2O$

Os fluxos acumulados de  $N_2O$  em cada parcelamento estão representados na figura 25.

Figura 25. Fluxos acumulados de  $N_2O$  (em  $mg\ m^{-2}$ ) após cada parcelamento da adubação nitrogenada, durante a safra 22/23. (Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

Para o 1º parcelamento da adubação não foram observadas diferenças estatísticas ( $p < 0,05$ ) entre as tecnologias para fertilizantes nitrogenados. Foram registrados os seguintes fluxos de emissão de  $N_2O$ : organomineral ( $103,9 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = ureia ( $102,2 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = blend 2 ( $94,8 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = blend 1 ( $79,5 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = controle ( $75,1 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ).

Após a 2ª adubação, observou-se que blend 2, organomineral e ureia apresentaram as maiores emissões de  $N_2O$ , não diferindo estatisticamente entre si. O blend 1 apresentou um fluxo intermediário e o controle apresentou menor fluxo de emissão diferindo-se estatisticamente dos demais. Neste período, o fluxo de emissão de  $N_2O$  seguiu a seguinte ordem decrescente: blend 2 ( $63,2 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = organomineral ( $61,8 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = ureia ( $59,7 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) > blend 1 ( $48,9 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) > controle ( $23,3 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ).

A partir do 3º parcelamento da adubação também não foram observadas diferenças estatísticas entre os fluxos de  $N_2O$  acumulados, sendo registrados fluxos de emissão de: blend 2 ( $52,7 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ), organomineral ( $49,5 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ), ureia ( $48,4 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ), blend 1 ( $47,6 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) e controle ( $42,2 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ).

O fluxo médio acumulado de  $N_2O$  ao final de todas as avaliações foi igual a: organomineral ( $215,2 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = blend 2 ( $210,7 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) = ureia ( $210,3 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) > blend 1 ( $175,9 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ) > controle ( $140,6 \text{ mg } N_2O \text{ m}^{-2}$ ).

Na tabela 5, encontram-se os fatores de emissão encontrados para ureia, blends 1 e 2 e organomineral, aplicados na safra 22/23 na dose de  $400 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Tabela 5. Fatores de emissão de  $N-N_2O$  para ureia, blend 1, blend 2 e organomineral aplicados em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo - MG, Brasil.

Fontes	1º parcelamento	2º parcelamento	3º parcelamento	Média
	%			
Ureia	0,21	0,28	0,05	0,18
Organomineral	0,09	0,10	0,02	0,07
Blend 2	0,05	0,10	0,03	0,06
Blend 1	0,01	0,06	0,01	0,03

Os fatores de emissão encontrados para as condições ambientais dessa lavoura cafeeira se diferem dos valores médios de emissão relatados pelo IPCC (2006). No entanto se aproximam dos valores encontrados por Sarkis et al. (2023b) em um experimento conduzido no mesmo município de Santo Antônio do Amparo – MG. Na ocasião, os autores obtiveram um fator de emissão médio de  $N_2O$  para a ureia igual a 0,26%, utilizando-se a mesma dose de 400

kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> adotada neste experimento. Esses resultados confirmam que a interpretação do fator de emissão encontrado deve levar em consideração o volume e a intensidade das precipitações, além do fertilizante e dose de N aplicados, sendo estes, fatores que podem interferir diretamente nas emissões observadas, diferindo do padrão estabelecido pelo IPCC de 1% do N aplicado.

A tabela 6 apresenta a emissão média, em g ha<sup>-1</sup>, de N<sub>2</sub>O e a porcentagem de redução nas emissões das tecnologias para fertilizantes nitrogenados em relação à ureia.

Tabela 6. Emissões médias de N<sub>2</sub>O (g ha<sup>-1</sup>) após aplicação de 400 kg de N por ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Fertilizantes	Emissão (g de N <sub>2</sub> O ha <sup>-1</sup> )	Redução na emissão comparado à ureia (%)
Controle	1405,8 a	-
Ureia	705,1 b	-
Organomineral	269,8 bc	61,7
Blend 2	236,4 bc	66,5
Blend 1	162,8 c	76,9

Para o cálculo da emissão média de N<sub>2</sub>O pelos fertilizantes, foi descontado o valor emitido pelo tratamento controle = emissão do solo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 1% de significância.

Considerando os três parcelamentos, o controle apresentou a maior emissão (1405,8 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>). A ureia formou um grupo intermediário (705,1 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>), enquanto organomineral (269,8 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>), blend 2 (236,4 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) e blend 1 (162,8 g de N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>) não diferiram entre si, compondo o grupo com as menores emissões médias deste estudo.

Apesar da ausência de adubação nitrogenada no controle, o solo contém estoques de N que são continuamente transformados por processos microbianos, como nitrificação e desnitrificação, principais responsáveis pela produção de N<sub>2</sub>O. A maior emissão observada neste tratamento evidencia que, nas condições do experimento, o solo não fertilizado apresentou maior potencial de emissão em relação aos fertilizantes avaliados. Variáveis ambientais como pH (YANG et al., 2021), umidade, teor de matéria orgânica e disponibilidade de N e O<sub>2</sub> (VIEIRA, 2017) influenciam diretamente a dinâmica desses processos. Neste estudo, a umidade e o pH do solo podem ter favorecido a atividade microbiana, resultando em maiores fluxos de N<sub>2</sub>O no solo não fertilizado.

Considerando a ureia como referência, os fertilizantes testados reduziram as emissões de N<sub>2</sub>O: o blend 1 reduziu as emissões em 76,9%, seguido pelo blend 2 (66,5%) e pelo organomineral (61,7%). Esses resultados evidenciam o potencial das tecnologias empregadas em mitigar perdas de nitrogênio na forma de N<sub>2</sub>O para a atmosfera. Outros autores também

observaram redução nas emissões de  $N_2O$  quando utilizadas tecnologias para a ureia. Analisando os resultados obtidos com uso de nitrato de amônio, ureia tratada com NBPT e ureia convencional, Sarkis et al. (2023b) observaram redução nas emissões de  $N_2O$  de 78,5% para nitrato de amônio e 50,6% para ureia + NBPT. Já em uma revisão de literatura realizada por Mazzetto et al. (2020), os autores notaram reduções nas emissões de  $N_2O$  em relação à ureia convencional, quando utilizado ureia com inibidores de urease ou nitrificação (73,8%), ureia revestida (61,4%), sulfato de amônio (58,6%) e nitrato de amônio (26,2%). Os menores valores de emissão de  $N_2O$  do nitrato de amônio ocorrem devido a 50% do N na sua composição já estar na forma nítrica. Dessa forma, parte do N desse fertilizante não é nitrificada no solo após a sua aplicação, reduzindo a formação de  $N_2O$  durante a nitrificação. Além do fertilizante nitrogenado, os autores revelaram que o tipo de solo, dose de aplicação de fertilizantes e os diferentes usos da terra podem influenciar nas emissões de  $N_2O$ .

Os resultados deste estudo evidenciam que o uso de tecnologias aplicadas aos fertilizantes nitrogenados contribui para a mitigação das perdas de nitrogênio na forma de  $N_2O$  para a atmosfera. Contudo, persiste uma lacuna importante relacionada às emissões provenientes diretamente do solo, indicando a necessidade de estudos complementares para sua redução através do manejo.

## 5.5 Teores foliares de N

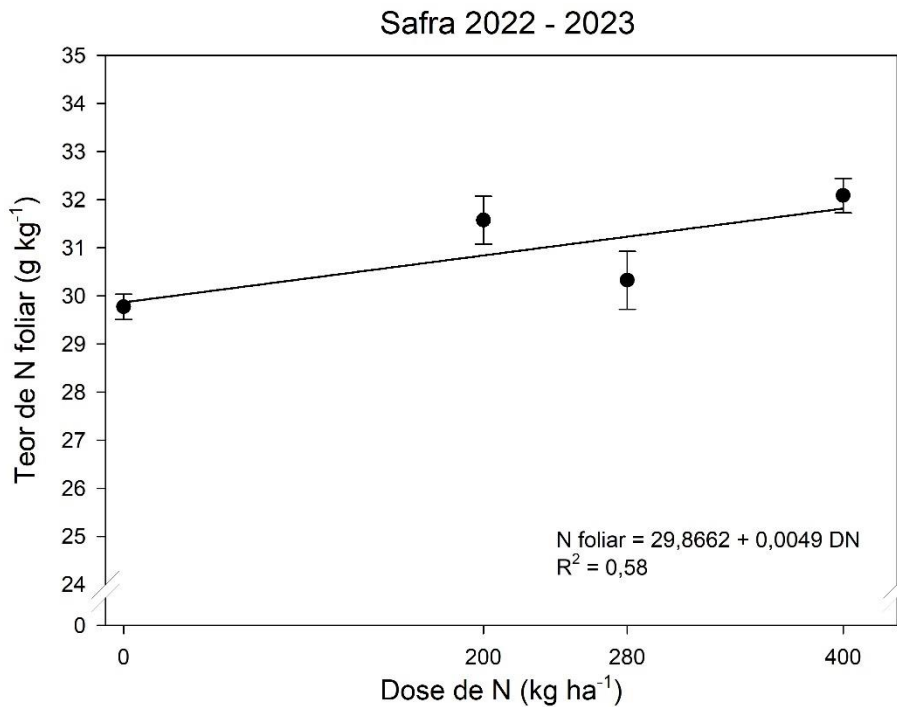
### 5.5.1. Safra 22/23

Os teores foliares de N foram influenciados significativamente ( $p \leq 0.05$ ) para o fator isolado doses de N. O fator fonte, de maneira isolada, e a interação entre fontes e doses, não apresentaram diferenças significativas.

O ajuste da regressão foi linear para o efeito isolado das doses (figura 26). Para cada  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N aplicados ao solo gerou um incremento de  $0,49 \text{ g kg}^{-1}$  no teor foliar para o nutriente.

Os teores foliares de nitrogênio para as doses 0, 200, 280 e  $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  foram de 29,9, 30,9, 31,2 e  $31,8 \text{ g kg}^{-1}$ . Para o café, a faixa adequada para N nas folhas encontra-se entre 25 a  $30 \text{ g kg}^{-1}$  de N (QUAGGIO ET AL., 2022).

Figura 26. Teores de nitrogênio foliar em função das doses aplicadas para a safra 22/23. (DN = Dose de nitrogênio, em  $\text{kg ha}^{-1}$ )

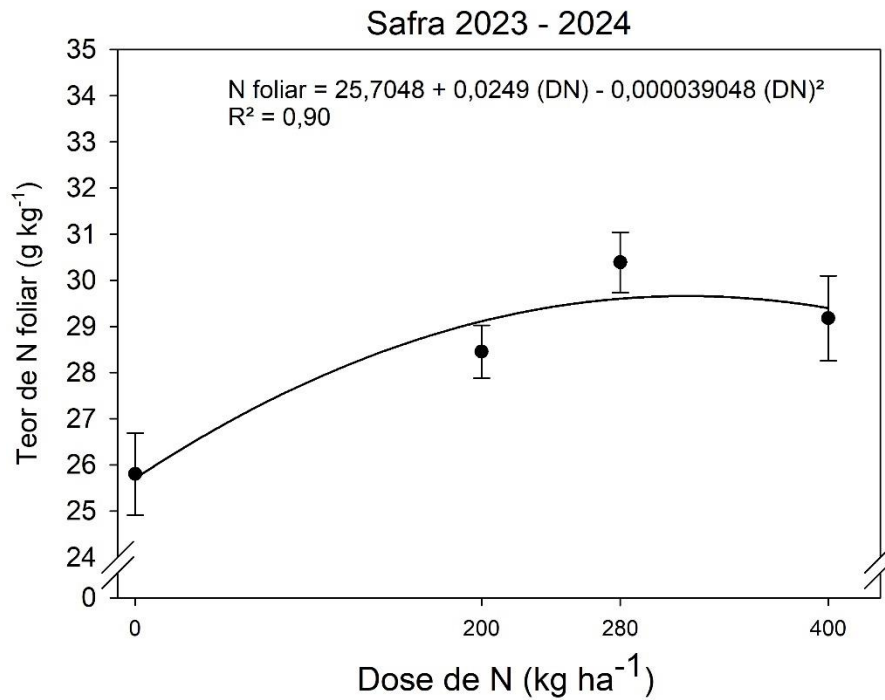


### 5.5.2. Safra 23/24

Os teores foliares de N foram influenciados ( $p \leq 0,05$ ) pelo fator isolado de “doses de N”. A interação entre fontes e doses e o fator fonte, de maneira isolada, não apresentaram diferenças estatísticas significativas.

Os teores foliares de N se ajustaram a um modelo quadrático (figura 27). A partir da equação estimada pelo modelo, concluímos que a dose de  $319 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  resultou em um maior incremento dos teores foliares de N ( $29,7 \text{ g kg}^{-1}$ ). Em estudo conduzido por Dutra (2022) na cultura do café, foi avaliado o incremento de N nos teores foliares com a utilização de ureia convencional, nitrato de amônio e 3 diferentes blends. O autor não observou diferença significativa quanto às fontes no incremento foliar, mas sim para o fator isolado “doses de N”. Para as condições e fontes adotadas pelo autor, a dose que correspondeu ao maior incremento nos teores foliares foi com a aplicação de  $348,22 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N.

Figura 27. Teores de nitrogênio foliar em função das doses aplicadas para a safra 23/24. (DN = Dose de nitrogênio, em  $\text{kg ha}^{-1}$ )



Fonte: Da autora, 2024.

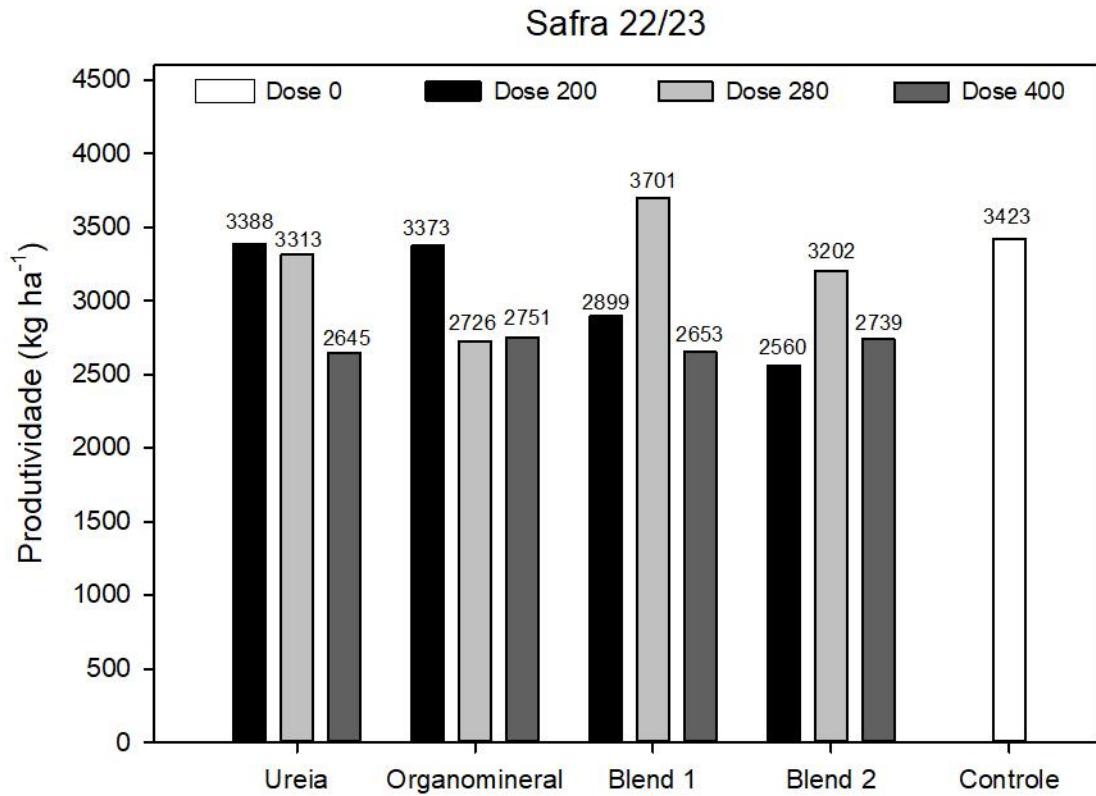
De acordo com a equação de regressão estimada, os teores foliares de nitrogênio para as doses 0, 200, 280 e 400  $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  foram de 25,7, 29,1, 29,6 e 29,4  $\text{g kg}^{-1}$ , respectivamente. Todos os teores encontrados nas doses avaliadas encontram-se dentro da faixa adequada de 25 a 30  $\text{g kg}^{-1}$  (QUAGGIO ET AL., 2022).

## 5.6 Produtividade e rendimento

Não houve efeito ( $p > 0.05$ ) isolado das fontes ou doses de N, nem da sua interação na produtividade do cafeeiro, tanto na safra 22/23 como na safra 23/24 (Figura 28).

A produtividade média da safra 22/23 foi de 3102  $\text{kg ha}^{-1}$  o que corresponde a 51,7 sacas  $\text{ha}^{-1}$ .

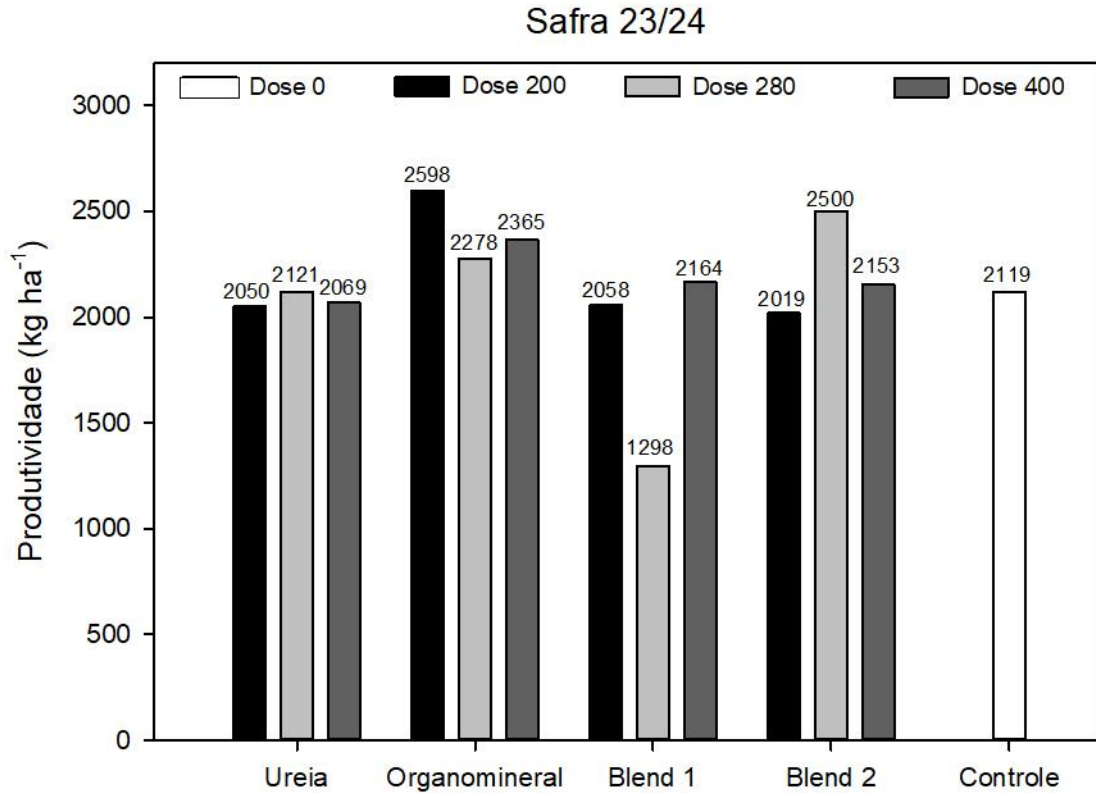
Figura 28. Produtividade do cafeeiro, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

Na safra 23/24 a produtividade média da lavoura foi de  $2134 \text{ kg ha}^{-1}$ , totalizando uma produtividade média de  $35,6 \text{ sacas ha}^{-1}$ , valor em torno de 31,2% menor em relação à safra anterior, que é explicado pela bienalidade da cultura e condições climáticas variáveis a cada safra. Considerando o biênio, a média de produtividade foi de  $43,6 \text{ sacas ha}^{-1}$ , ou seja,  $2618,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de café beneficiado.

Figura 29. Produtividade do cafeeiro, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

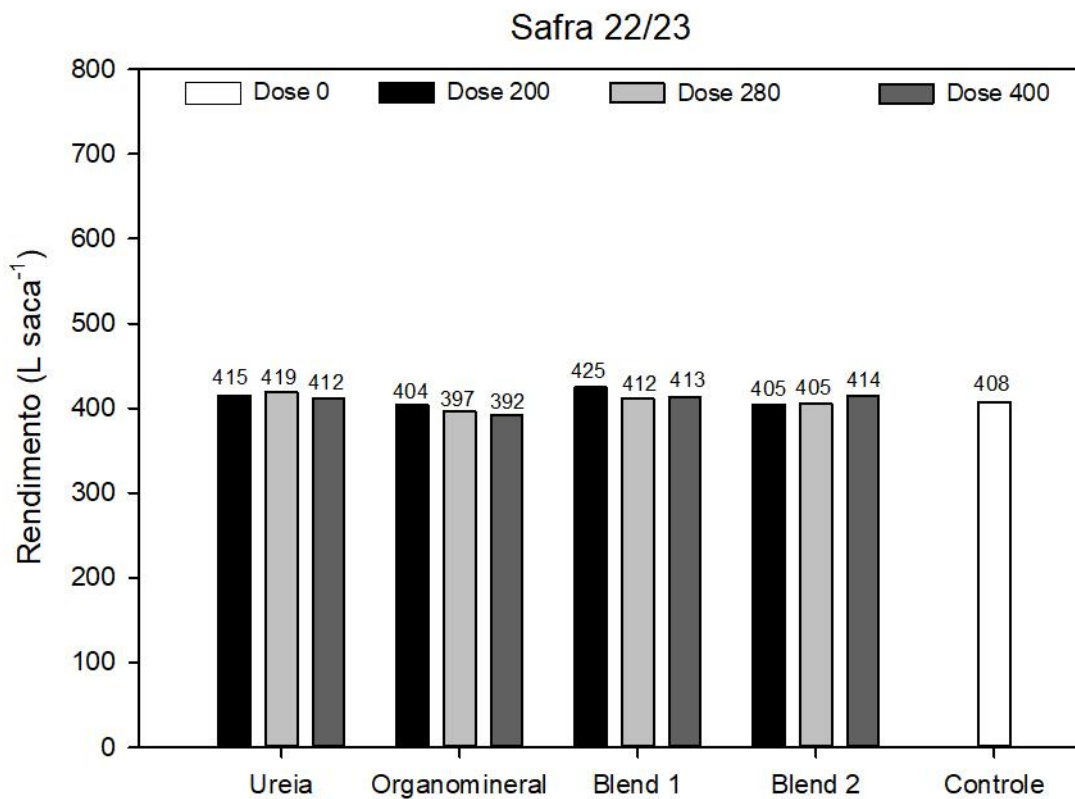
Por se tratar de uma cultura perene, os resultados dos efeitos de diferentes doses e fontes de fertilizantes na produtividade do cafeeiro podem não ser detectados prontamente em experimentos de curta e média duração, conforme observado por Dutra (2022). Ao avaliar a influência de 3 blends e 2 fontes convencionais, submetidos a variações de doses, o autor não encontrou diferenças significativas na produtividade para o período de uma safra de avaliação. Em outro estudo, diferenças significativas na produtividade do cafeeiro só foram observadas por Valadares et al. (2013) a partir da 3ª safra de cultivo de café em um experimento de média duração, no qual os autores avaliaram a influência da adubação com N e K na produtividade e bionalidade do cafeeiro durante 6 safras consecutivas. Dessa maneira, o presente estudo pode não ter manifestado diferenças significativas para produtividade devido ao curto período de avaliação (2 safras).

Outro indicativo de que curtos períodos de avaliação podem ocultar o efeito das doses e fontes na produtividade da cultura é a ausência de diferença estatística observada neste trabalho entre o tratamento controle e os demais. A ausência ou o fornecimento insuficiente de

N à cultura podem afetar diretamente a produtividade devido à alta demanda pelo nutriente, no entanto, isto pode não ter ocorrido devido à presença de estoques de N em profundidade no solo, responsáveis por suprir as demandas da cultura. Essas reservas, conforme descrito por Hernández López (2024), Freitas (2020) e Sarkis et al. (2023b), são utilizadas pelas plantas para suprir parte de sua demanda pelo nutriente durante o ciclo produtivo. Portanto, diferenças significativas poderão ser notadas a longo prazo, à medida que as reservas do solo são consumidas e, conseqüentemente, os estoques de N no solo são esgotados. O rendimento não foi influenciado significativamente ( $p > 0.05$ ) pelas fontes e doses de N nem pela sua interação.

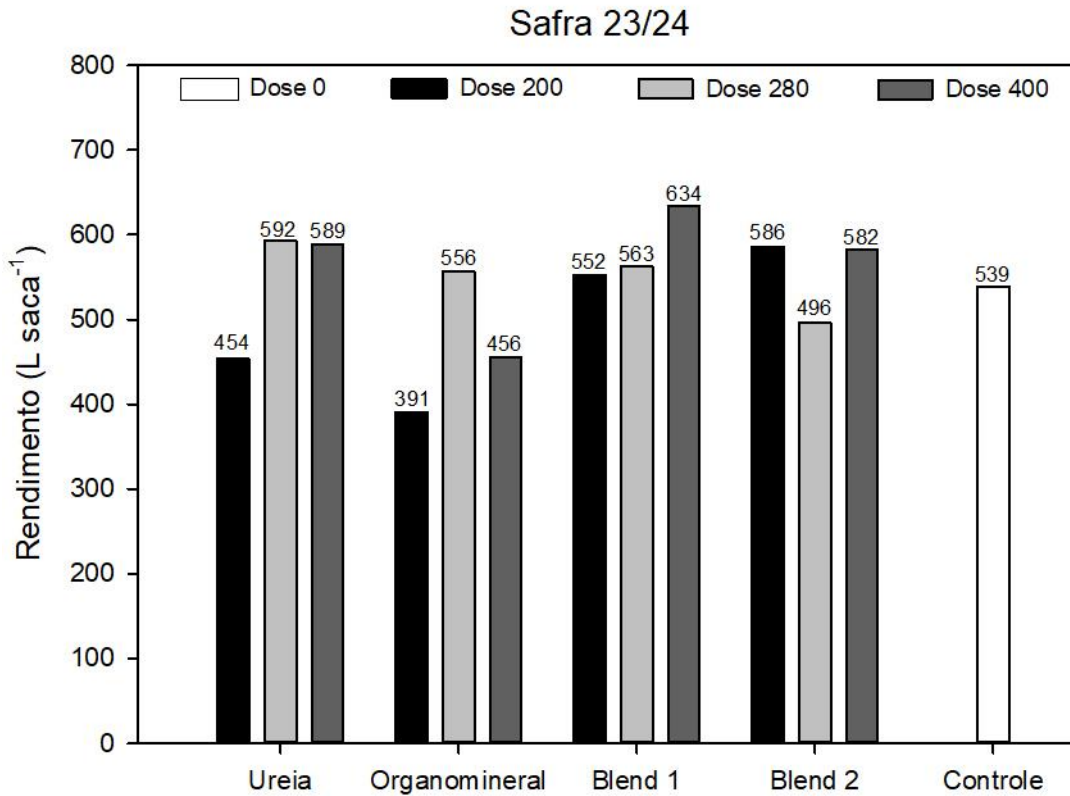
O rendimento médio para a safra 22/23 foi de 409,0 L saca<sup>-1</sup>, enquanto para a safra 23/24 foi de 537,9 L saca<sup>-1</sup>. O rendimento médio, considerando-se o biênio, foi de 473,4 litros de café colhidos para produzir uma saca de café beneficiado.

Figura 30. Rendimento do cafeeiro (em litros saca de 60 kg<sup>-1</sup>) em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

Figura 31. Rendimento do cafeeiro (em litros saca de 60 kg<sup>-1</sup>) em função dos fertilizantes nitrogenados aplicados em diferentes doses, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

Durante a safra 22/23, foram observados valores de rendimento variando entre 396,8 e 419,4 litros saca<sup>-1</sup>. Em contrapartida, para a safra 23/24 os valores de rendimento variaram, em média, na faixa entre 390,6 e 633,7 litros saca<sup>-1</sup>.

O rendimento diz respeito a quantidade de café colhido, em litros, necessária para compor uma saca de café beneficiado de 60 kg. Ou seja, quanto maior for o rendimento de uma lavoura, maior será a quantidade de café necessária para compor uma saca. A partir disso, nota-se que a safra 22/23 apresentou valores médios de rendimento menores em comparação à safra 23/24, o que pode estar associado a uma melhor sincronização na maturação dos frutos, promovida pelo maior volume de precipitação, favorecendo o enchimento dos grãos e acúmulo de massa seca. A restrição hídrica também influenciou no rendimento do café durante estudo conduzido por Dutra (2022). O autor observou que o rendimento médio de 623 litros de café

colhido para compor uma saca de 60 kg pode ter sido influenciado pela ocorrência de déficit hídrico em estádios específicos do desenvolvimento dos grãos, afetando a granação e, conseqüentemente, o rendimento final.

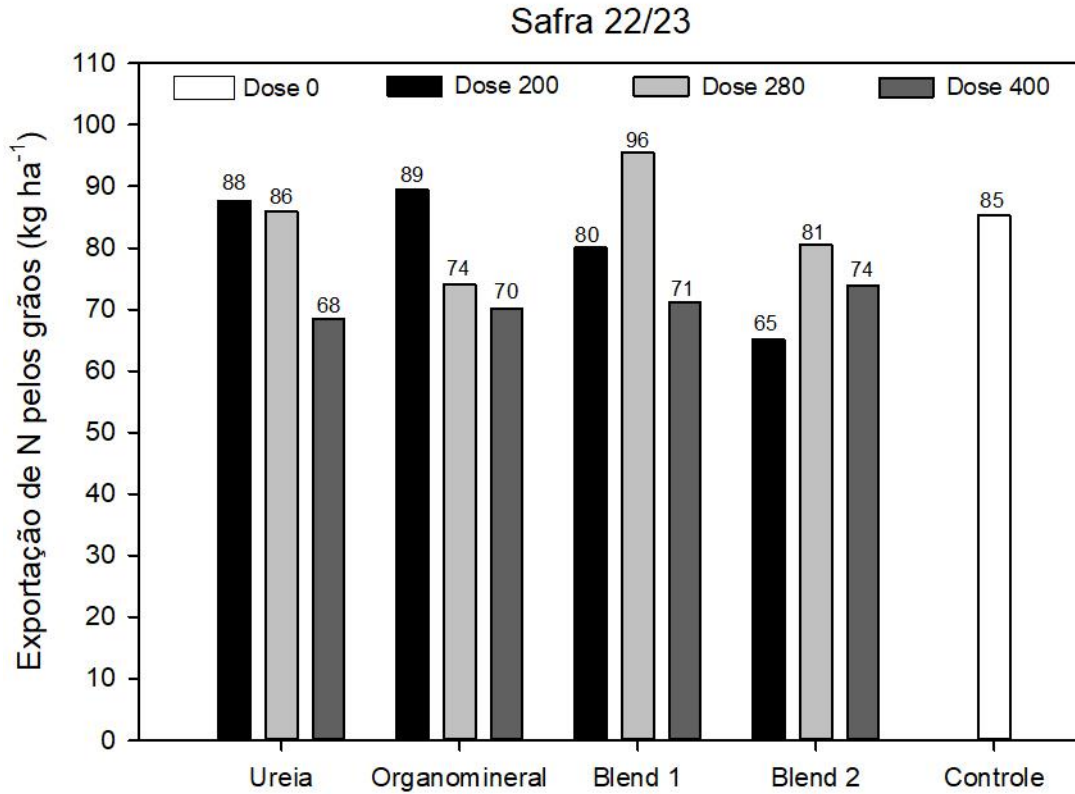
Além da precipitação, a fonte utilizada para fornecimento de N pode influenciar no rendimento da cultura, conforme observado por Chagas (2018) em seu estudo, no qual foram utilizadas as fontes nitrato de amônio, ureia convencional e blends. O autor constatou que nitrato de amônio e os blends resultaram em menores valores para rendimento, enquanto a ureia convencional e o tratamento controle apresentaram desempenho inferior, com valores médios para o biênio iguais a 531 e 542 litros de café por saca de café beneficiado. O autor destaca que, coincidentemente, a fonte com maiores perdas por volatilização (ureia convencional) também apresentou os maiores rendimentos.

### **5.7 Exportação de N nos grãos e cascas**

Não houve efeito significativo ( $p>0.05$ ) das doses e fontes de N e nem da sua interação sobre a exportação de N nos grãos em ambas as safras.

A exportação média nos grãos na safra 22/23 foi de 80,2 kg de N ha<sup>-1</sup>. Os valores de exportação variaram em uma faixa entre 65,1 kg de N por ha<sup>-1</sup> até 95,6 kg de N por ha<sup>-1</sup>. Foram encontrados teores médios de N nos grãos iguais a 2,6 dag kg<sup>-1</sup>.

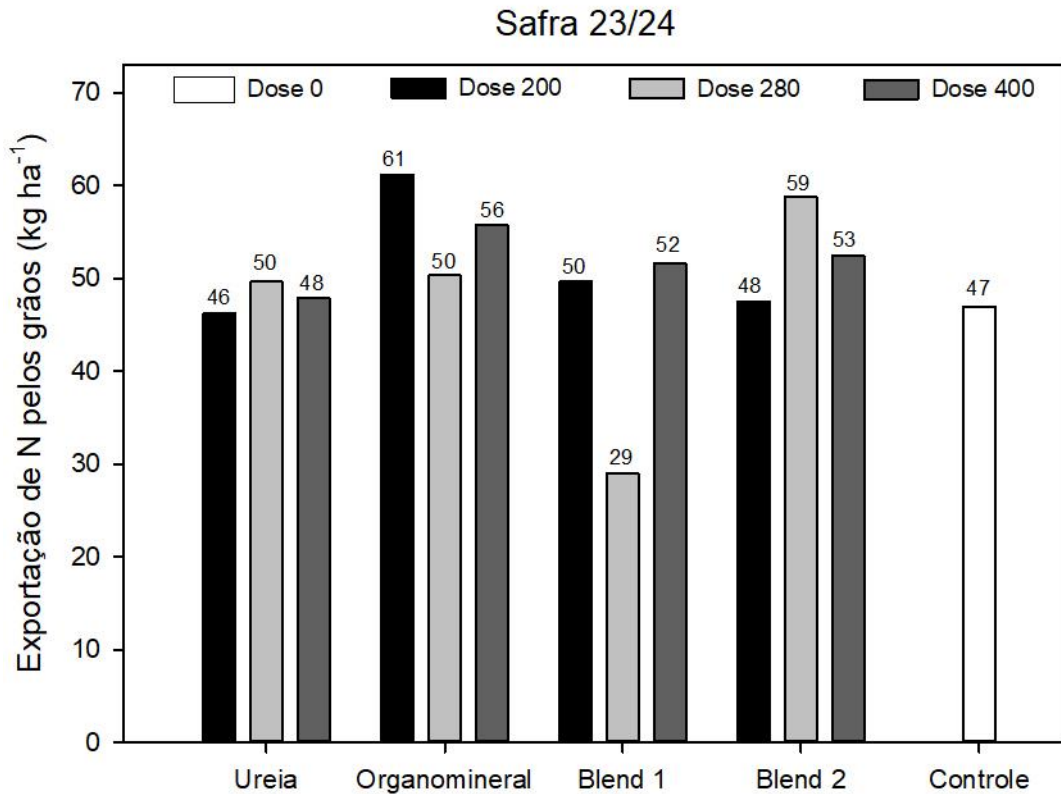
Figura 32. Exportação de N pelos grãos (em  $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade)



Fonte: Da autora, 2024.

Para a safra 23/24, a exportação média de N nos grãos foi de  $49,3 \text{ kg ha}^{-1}$ , valor cerca de 60% menor em relação à safra anterior, que pode ser explicado pela bienalidade da cultura e, conseqüentemente, menor produtividade ( $2134 \text{ kg ha}^{-1}$ ) em relação à safra 22/23 ( $3103 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e maior exportação de N nos grãos. A faixa de variação na exportação de N pelos grãos foi de  $46,3 \text{ kg ha}^{-1}$  até  $61,2 \text{ kg ha}^{-1}$  e o teor médio encontrado nos grãos foi igual a  $2,3 \text{ dag kg}^{-1}$ .

Figura 33. Exportação de N pelos grãos (em  $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



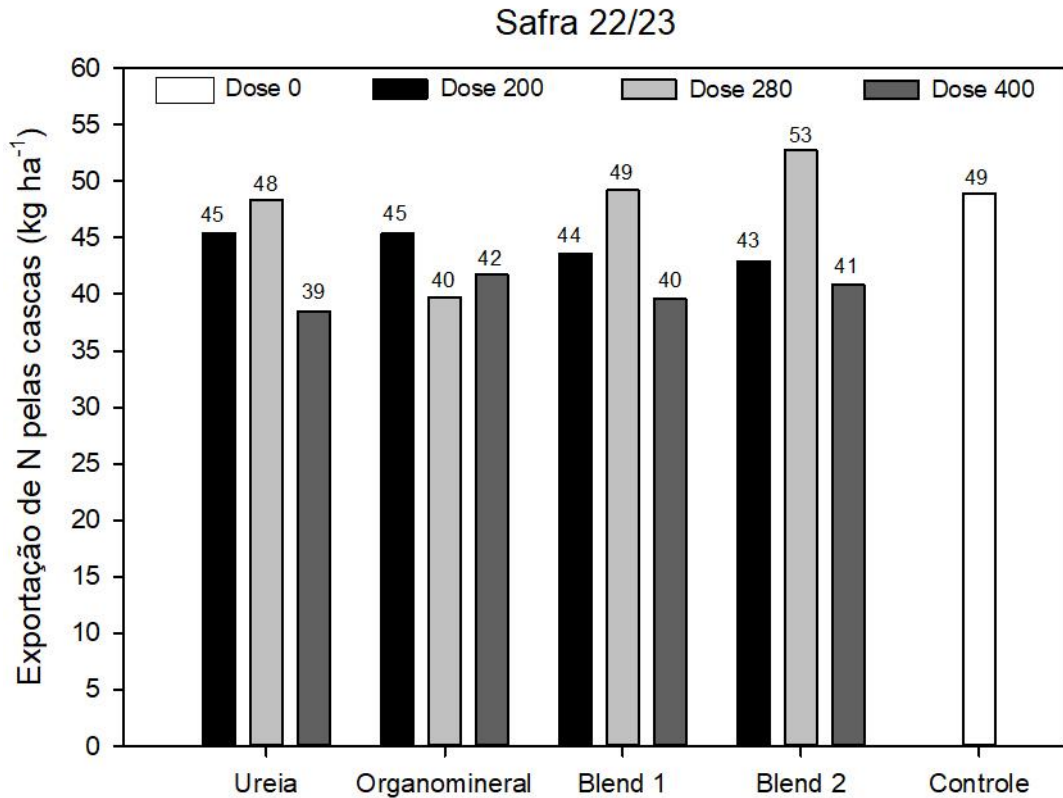
Fonte: Da autora, 2024.

O N é o segundo nutriente mais exportado pelos grãos (QUAGGIO ET AL., 2022; GARCIA, CARVALHO e GARCIA, 2009). Sua exportação pelos grãos é estimada em 22,2 kg para cada tonelada de café beneficiado colhido, para lavouras com expectativa de produtividade entre 1 a 3 toneladas por hectare de café beneficiado (QUAGGIO ET AL., 2022). Analisando as médias de exportação e produtividade obtidas para cada safra, nota-se que a safra 22/23 exportou  $11,3 \text{ kg t}^{-1}$  a mais em relação ao valor de referência estabelecido por Quaggio et al. (2022), o que pode ser justificado pela alta produção nesta safra. Já a safra 23/24 exportou  $1,9 \text{ kg t}^{-1}$  a mais em comparação ao valor médio de referência.

Também não foi observado efeito ( $p > 0.05$ ) isolado das doses ou fontes, nem da sua interação na exportação de N nas cascas, em ambas as safras.

Durante a safra 22/23, a exportação média na casca foi de  $45,2 \text{ kg de N ha}^{-1}$ , variando numa faixa entre  $39,6$  e  $52,7 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . O teor médio de N encontrado nas cascas foi de  $1,5 \text{ dag kg}^{-1}$ .

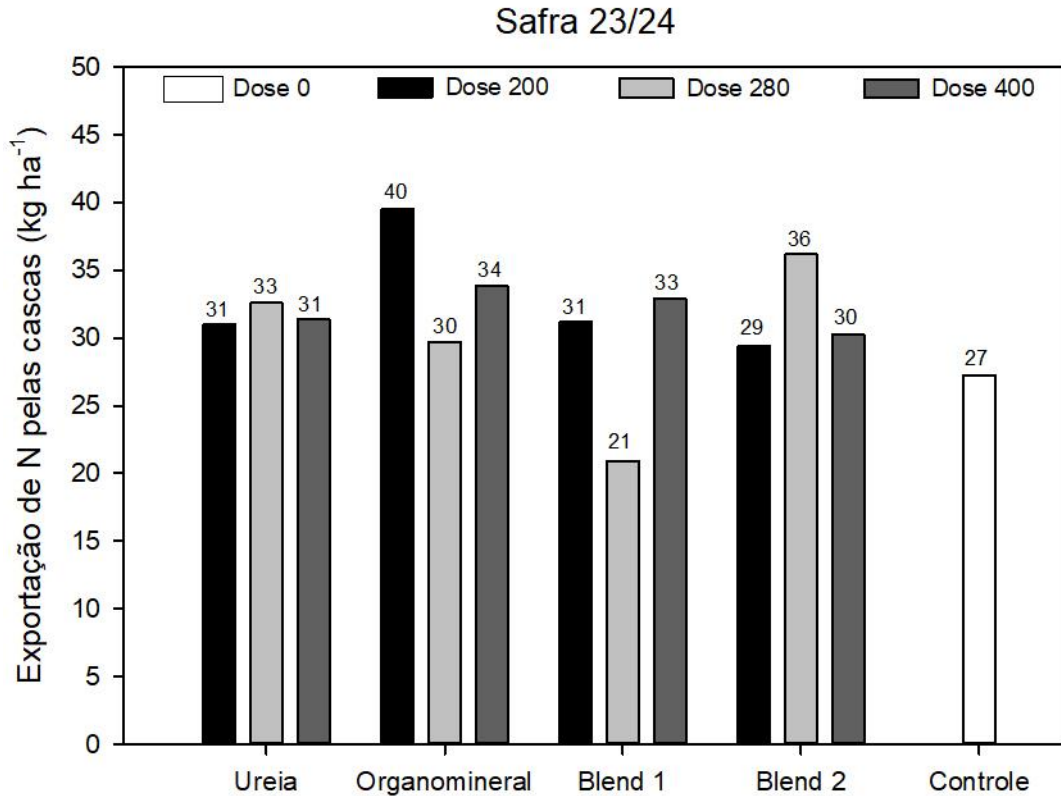
Figura 34. Exportação de N pelas cascas (em  $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 22/23. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

Para a safra 23/24, a média de exportação de N nas cascas foi de  $30,5 \text{ kg ha}^{-1}$ , variando numa faixa entre  $20,9$  e  $39,5 \text{ kg ha}^{-1}$ . O teor encontrado nas cascas foi de  $1,5 \text{ dag kg}^{-1}$ . Considerando o biênio, a média de exportação de N nas cascas foi de  $46,1 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Figura 35. Exportação de N pelas cascas (em  $\text{kg ha}^{-1}$ ) em função da aplicação de diferentes fontes e doses no cafeeiro, na safra 23/24. (As médias não diferiram entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade).



Fonte: Da autora, 2024.

As cascas representam aproximadamente 50% do peso dos frutos e o teor médio de N esperado varia de 1,5 a 2,5  $\text{dag kg}^{-1}$  (GARCIA, CARVALHO e GARCIA, 2009). O teor médio encontrado nesse estudo (1,5  $\text{dag kg}^{-1}$  em ambas as safras) encontra-se dentro da faixa estabelecida. Os valores de N nas cascas encontrados por Sarkis et al. (2023a) em um experimento com doses e fontes nitrogenadas na cultura do café também se ajustaram à faixa esperada, com teores médios de 1,6  $\text{dag kg}^{-1}$ . Os autores também não observaram diferenças significativas em relação às doses de N, fontes e da interação entre elas.

A casca ou palha de café é um subproduto rico em nutrientes e matéria seca, advindo do beneficiamento, e que necessita de uma destinação correta, visto que é um resíduo produzido em grandes quantidades após a colheita. Em um estudo conduzido por Da Graça e Caldas (2017) no município de Varginha – MG, foi estimado que a produção de resíduos advindos do beneficiamento do café é, em média, de 6900 toneladas por ano. Alguns destinos comuns são: uso como adubo orgânico em diferentes culturas (DE LIMA ET AL., 2019; JIANG ET AL.,

2023; TRAN ET AL., 2020), complemento para produção de ração animal (VEGRO, DE CARVALHO, 1994), substrato para produção de mudas (DE ALMEIDA ET AL., 2021), além de uso como substituto ao carvão na torrefação do café.

A exportação total de N somando-se grãos e cascas foi, em média, de 125,4 kg ha<sup>-1</sup> para a safra 22/23 e de 79,8 kg ha<sup>-1</sup> para a safra 23/24.

## 5.8 Classificação dos grãos por peneiras

Com base nas doses de N e tecnologias avaliadas, a distribuição dos grãos de café por peneira, de acordo com sua granulometria, está representada na tabela 7. Para todas as doses de N e fertilizantes, o maior percentual da amostra ficou retido entre as peneiras 15 a 17.

Tabela 7. Porcentagem retida por peneira em função das doses e fontes, em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo - MG na safra 23/24.

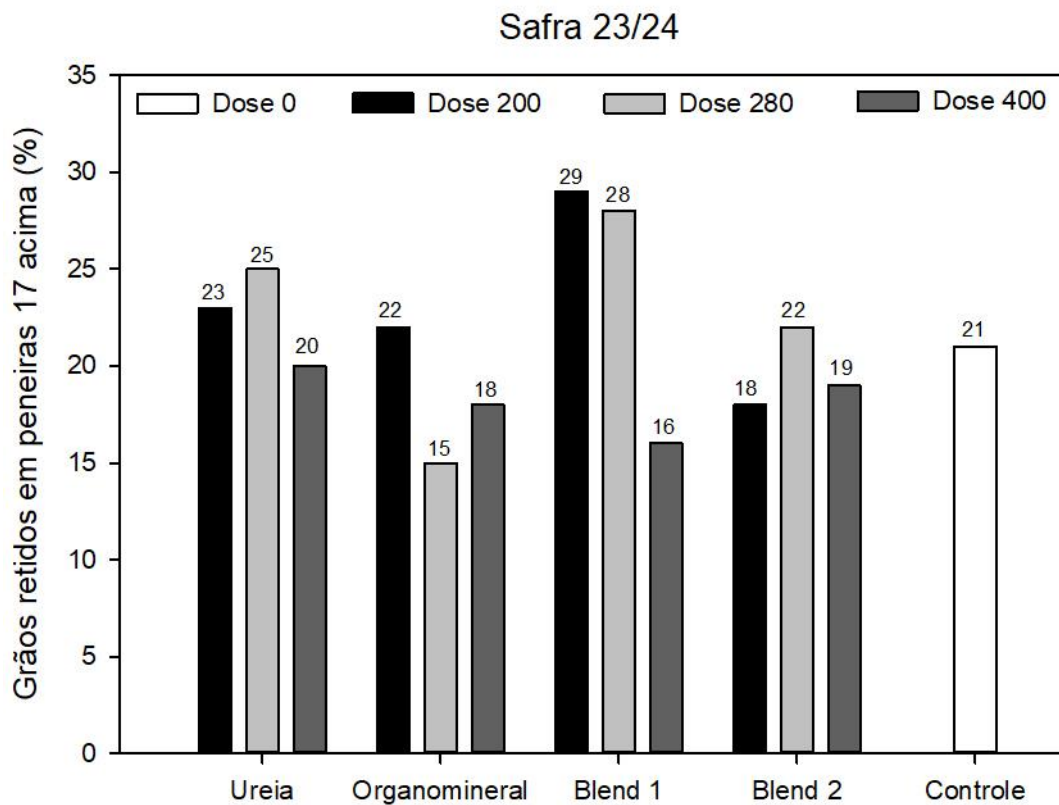
Tratamentos	Porcentagem retida por peneira (%)									
	19	18	17	16	15	14	11	10	9	fundo
Controle - 0	0	3	18	35	20	5	6	10	1	2
Ureia - 200	1	5	17	31	19	6	6	12	1	2
Ureia - 280	0	5	20	34	17	4	8	9	1	2
Ureia - 400	0	4	16	32	20	6	7	9	2	4
Organo - 200	1	3	18	29	20	7	7	11	1	3
Organo - 280	0	3	12	32	24	8	5	11	1	4
Organo - 400	0	3	15	32	23	7	5	9	2	4
Blend 1 - 200	1	5	23	28	17	7	8	9	1	1
Blend 1 - 280	1	5	22	29	17	5	7	11	1	2
Blend 1 - 400	0	3	13	27	25	10	7	9	2	4
Blend 2 - 200	0	3	15	32	22	6	6	11	2	3
Blend 2 - 280	0	5	17	30	18	5	12	11	1	1
Blend 2 - 400	0	4	15	31	24	8	5	10	1	2

Nota: organo = organomineral; Na coluna tratamentos, valores de 0, 200, 280 e 400 representam as doses, em kg ha<sup>-1</sup>

A classificação granulométrica avalia a qualidade dos grãos de acordo com o formato e o tamanho. Compreender o tamanho dos grãos é importante pelo fato de influenciar diretamente na uniformidade da torra do produto (DE SOUZA ET AL., 2018) e na sua comercialização, visto que grãos do tipo chato graúdo (peneira 17 acima) influenciam positivamente na formação

do preço da saca, sendo um atributo importante da precificação do café (SOBREIRA ET AL. (2018). Grãos maiores estão associados a uma melhor qualidade de bebida, maior uniformidade na torra (DE SOUZA ET AL, 2018) e valor de mercado elevado (LAVIOLA ET AL, 2006), visto que estão menos suscetíveis a quebras e defeitos. A média geral da porcentagem retida de grãos chatos graúdos, nas peneiras 17 e superiores correspondem a 21% dos grãos das amostras analisadas.

Figura 36. Porcentagem de grãos retidos nas peneiras 17 e superiores em função das fontes e doses aplicadas no cafeeiro em Santo Antônio do Amparo – MG, na safra 23/24.



Fonte: Da autora, 2024.

A ureia apresentou, em média, 23% de seus grãos retidos nas peneiras 17 acima. A ordem decrescente de porcentagem retida, com base nas doses avaliadas para a ureia convencional, foi: dose 280 > dose 200 > dose 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N, com valores de 25, 23 e 20%, respectivamente.

O fertilizante organomineral forneceu a menor média geral dentre as fontes, com 18% dos grãos retidos nas peneiras 17 acima, seguindo-se a ordem decrescente para as doses: dose 200 > dose 400 > dose 280 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N, com valores de 22, 18 e 15%, respectivamente.

De todas as fontes, o blend 1 apresentou a maior porcentagem de grãos nas peneiras 17 acima, com média de 29% e 28% de grãos retidos nas doses de 200 e 280 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N, respectivamente. Na dose 400 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N, a porcentagem retida se distanciou das demais doses, com valor em torno de 16% de grãos graúdos. A média geral para o blend 1 foi de 24%.

Para o blend 2, as porcentagens retidas nas peneiras 17 acima foram de 22, 19 e 18% para as doses 280, 400 e 200 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de N, respectivamente. A média geral foi de 20% dos grãos retidos nas peneiras 17 acima.

É importante enfatizar que a influência das doses de N e das tecnologias não foi analisada estatisticamente neste experimento. Outros autores avaliaram a influência de fontes e doses de N na classificação granulométrica do café e encontraram resultados significativos. A adubação com diferentes doses (100% e 70% da dose recomendada) e fontes de N (ureia, nitrato de amônio e blends), em experimento conduzido por Chagas (2018), demonstrou que não houve diferença significativa para a classificação por peneiras no primeiro ano de condução. Já no segundo ano de avaliação e no biênio, o autor observou diferenças significativas, com destaque para o nitrato de amônio e o blend Polyblen Montanha<sup>®</sup> com 100% e 70% da dose recomendada, os quais apresentaram os maiores percentuais de grãos tipo chato graúdo em relação aos demais. Souza (2019) também observou diferenças significativas quanto às fontes de N utilizadas na porcentagem retida em peneiras 17 acima. Em outro estudo conduzido por Laviola et al. (2006) com diferentes cultivares, foram avaliadas a influência de níveis de adubação (baixo, adequado e alto) com nitrogênio, fósforo e potássio na formação de grãos mocas e no tamanho dos grãos de café. Os autores observaram que o nível de adubação adequado resultou em uma maior proporção de grãos chatos graúdos (peneira 17 acima) para 3 das cultivares estudadas. Além disso, notaram que a carga pendente de frutos e o estado nutricional das plantas também influenciaram na porcentagem de grãos retidos nas peneiras acima de 17, não sendo a adubação o fator isolado responsável pela variação no tamanho dos grãos. A granulometria dos cafés pode ser afetada pela genética, condições climáticas, nutrição e manejo do cafeeiro (MATIELLO ET AL., 2015).

O manejo da adubação nitrogenada via fertirrigação também foi estudado quanto à influência na classificação granulométrica do café. Ao avaliar a produção e o tamanho dos

grãos de café da cultivar Obatã sob efeito de cinco níveis de nitrogênio aplicados em fertirrigação ou adubação convencional com ureia, Silveira et al. (2015) observaram que o tamanho dos grãos apresentou peneira inferior a 16 quando a adubação nitrogenada foi realizada de maneira convencional (via solo), dividida em três parcelamentos. Segundo resultados alcançados pelos autores, a fertirrigação proporcionou aumento no tamanho dos grãos de café. Isso demonstra como a escolha de manejo da adubação e condução da cultura também podem influenciar na classificação granulométrica dos grãos. Por outro lado, em um estudo conduzido por Langoni et al. (2019) avaliando o fornecimento de nitrogênio e potássio via fertirrigação em diferentes doses, não foi observada nenhuma influência dos tratamentos na maturação e no tamanho dos grãos.

Há poucos estudos que correlacionam os efeitos de doses e fontes nitrogenadas no tamanho e qualidade dos grãos de café. Torna-se necessária a realização de mais pesquisas para elucidar como as fontes nitrogenadas e suas tecnologias podem influenciar na classificação dos grãos por peneiras e, conseqüentemente, na obtenção de um produto mais uniforme para a torra e de maior valor agregado para a comercialização.

## **5.9 Análise sensorial dos cafés**

A análise sensorial das amostras de café obtidas a partir das doses e tecnologias estudadas demonstrou que a média geral de pontuação foi de 83,8 pontos. Para que um café seja enquadrado como café especial deve atingir pontuação entre 80 e 100 pontos na análise sensorial. Neste caso, todas as amostras apresentaram notas entre 83 e 84,5 e foram classificadas como premium de acordo com a SCAA (2008).

A pontuação média após avaliação de 3 *Q-graders* encontra-se na tabela 8.

Tabela 8. Pontuação média por atributo avaliado na análise sensorial para os fertilizantes e doses estudadas e pontuação final.

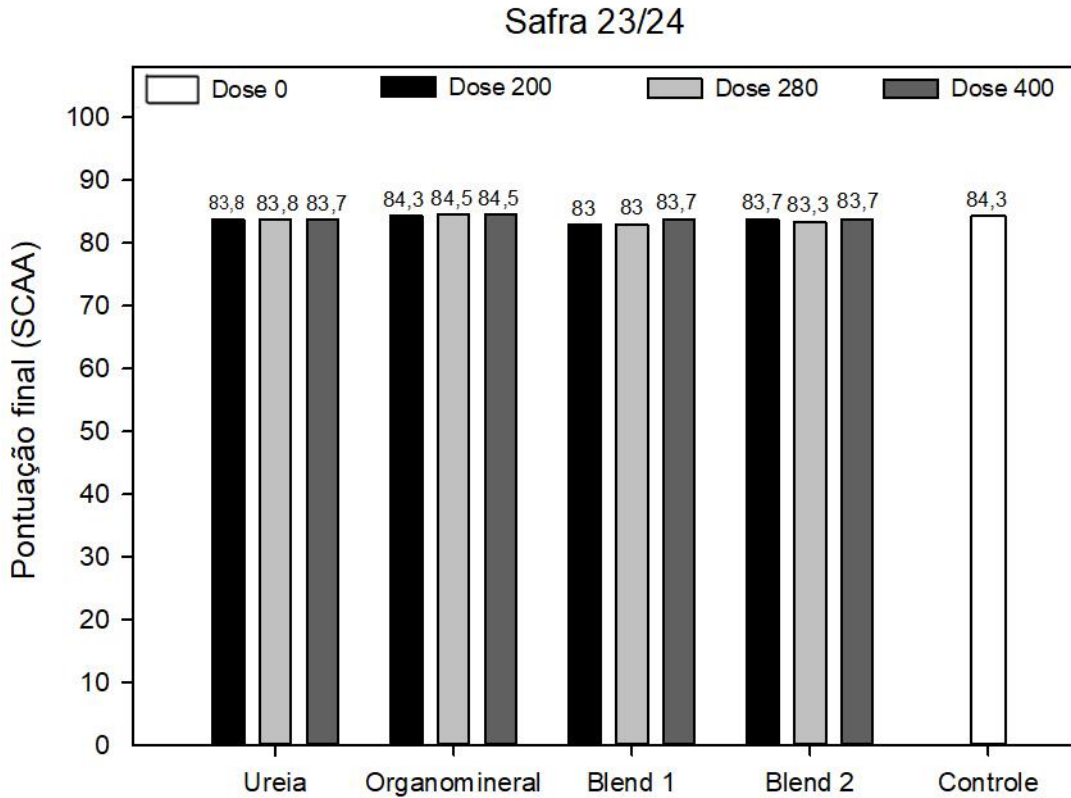
Tratamentos	Pontuação por atributo										Pontuação final
	Fragrância/aroma	Uniformidade	Ausência de defeitos	Doçura	Sabor	Acidez	Corpo	Finalização	Equilíbrio	Final	
Controle - 0	7,7	10,0	10,0	10,0	8,0	7,8	8,0	7,7	7,5	7,7	84,3
Ureia - 200	7,5	10,0	10,0	10,0	8,0	7,7	8,0	7,5	7,7	7,5	83,8
Ureia - 280	7,5	10,0	10,0	10,0	7,8	7,8	8,0	7,7	7,5	7,5	83,8
Ureia - 400	7,5	10,0	10,0	10,0	7,7	7,8	8,0	7,5	7,5	7,7	83,7
Organo - 200	7,7	10,0	10,0	10,0	7,8	7,7	8,0	7,8	7,7	7,7	84,3
Organo - 280	7,8	10,0	10,0	10,0	8,0	7,7	8,0	7,7	7,7	7,7	84,5
Organo - 400	7,5	10,0	10,0	10,0	8,0	7,7	8,0	7,7	7,8	7,8	84,5
Blend 1 - 200	7,5	10,0	10,0	10,0	7,5	7,7	7,8	7,5	7,5	7,5	83,0
Blend 1 - 280	7,5	10,0	10,0	10,0	7,7	7,5	7,8	7,5	7,5	7,5	83,0
Blend 1 - 400	7,5	10,0	10,0	10,0	7,7	7,7	8,0	7,7	7,5	7,7	83,7
Blend 2 - 200	7,5	10,0	10,0	10,0	8,0	7,7	8,0	7,5	7,5	7,5	83,7
Blend 2 - 280	7,5	10,0	10,0	10,0	7,8	7,5	8,0	7,5	7,5	7,5	83,3
Blend 2 - 400	7,5	10,0	10,0	10,0	8,0	7,5	8,0	7,7	7,5	7,5	83,7

Nota: organo = organomineral; Na coluna tratamentos, valores de 0, 200, 280 e 400 representam as doses, em kg ha<sup>-1</sup>; Média com base na avaliação de três q-graders certificados.

Os atributos uniformidade, doçura e ausência de defeitos receberam a mesma média de pontuação (10 pontos) para todas as doses e tecnologias de fertilizantes avaliadas. Os demais demonstraram pequenas variações de pontuação, apresentando 0,5 pontos de diferença entre a maior e menor nota média atribuída para sabor, 0,3 para os atributos de acidez, finalização, equilíbrio e final, e 0,2 para corpo.

A qualidade da bebida pode ser influenciada pelas doses de N utilizadas, conforme foi comprovado por Souza (2019). O autor conduziu o experimento por 3 safras e observou que o aumento na dose de N implicou em decréscimo linear da nota atribuída pela análise sensorial da bebida, nas duas primeiras safras de condução (2015/2016 e 2016/2017). Na última safra avaliada, o decréscimo foi quadrático, ou seja, adubações com menores doses de N (tratamento controle, sem adubação nitrogenada) proporcionaram bebidas de melhor qualidade (pontuação mais alta, igual a 85). Esses resultados vão ao encontro de outro estudo conduzido por Amorim et al (1973) sobre o efeito da adubação nos teores nutricionais em frutos e na qualidade da bebida. Os autores constataram que o aumento no teor de N nos grãos estava relacionado a perdas na qualidade da bebida.

Figura 37. Pontuação média da análise sensorial (“prova de xícara”) para amostras de café obtidas a partir de diferentes doses e fontes de nitrogênio, em lavoura cafeeira em Santo Antônio do Amparo – MG, na safra 23/24.



Fonte: Da autora, 2024.

Além da influência das doses de N na qualidade da bebida, um estudo conduzido por Malta, Nogueira e Guimarães (2003) com a cultivar Topázio em São Sebastião do Paraíso – MG concluiu que duas das fontes nitrogenadas utilizadas (nitrocálcio e nitrato de amônio) influenciaram na prova de xícara, proporcionando bebidas de menor qualidade.

A qualidade pode ser influenciada por uma série de fatores, como maturação dos grãos (GARRUTI E GOMES, 1961), adubação (HÖFIG ET AL, 2024; MOREIRA ET AL., 2021), além do processamento e cuidados pós colheita (ABRAHÃO ET AL, 2010; FAVARIN ET AL., 2004; FUFA, ETANA E AGA, 2019; SCABELO, 2024), condições climáticas, regiões de produção, espécie e variedade (SAMPAIO, 1993).

## 6 CONCLUSÃO

Analisando-se os resultados dos testes de liberação, nota-se que o fertilizante organomineral atingiu taxas de liberação de N superiores a 97% aos 7 dias de avaliação, o que demonstra que o fertilizante não foi capaz de controlar a liberação do nutriente para o ambiente. Por outro lado, os blends promoveram liberação gradual de N para o solo, fornecendo o nutriente de forma sincronizada à demanda da cultura. Após as colheitas, o blend 1 ainda possuía 28% de N para ser liberado posteriormente e o blend 2, cerca de 5 a 6% do N aplicado.

O uso de tecnologias para fertilizantes foi eficiente para mitigar as perdas por volatilização de amônia, promovendo redução de até 71% das perdas de N-NH<sub>3</sub> em relação à ureia convencional, fertilizante com maiores perdas registradas (24,7% do N aplicado).

Os fluxos de emissão de N<sub>2</sub>O pelas tecnologias foram até 76,9% menores em relação a ureia convencional, demonstrando o potencial de redução de perdas na forma de N<sub>2</sub>O por meio da adoção de tecnologias para fertilizantes nitrogenados. No entanto, apesar dos avanços no controle das emissões associadas à adubação, ainda são necessários estudos complementares que explorem práticas de manejo alternativas voltadas à redução das emissões provenientes diretamente do solo.

A adoção de tecnologias para fertilizantes nitrogenados foi capaz de reduzir perdas de N para a atmosfera, garantindo maior eficiência no uso do nutriente e reduzindo impactos ambientais.

## REFERÊNCIAS

ABISOLO – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE TECNOLOGIA EM NUTRIÇÃO VEGETAL. **10º Anuário brasileiro das indústrias de tecnologia em nutrição vegetal 2024**. Campinas: SP. 2024.

ABRAHÃO, S.A. et al. **Coffee (*Coffea arabica* L.) bioactive compounds and antioxidant activity**. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, p. 414-420, 2010.

ALMEIDA, R.E.M. **Fertilizantes de eficiência aumentada: uso de ureia de liberação controlada ou com inibidores em sistemas agrícolas sustentáveis**. Embrapa Pesca e Aquicultura (CNPASA), 2016. 28 p.

AL-HASHEMI, Hamzah M. Beakawi; AL-AMOUDI, Omar S. Baghabra. **A review on the angle of repose of granular materials**. *Powder technology*, v. 330, p. 397-417, 2018.

AMORIM, HV de et al. **Estudos sobre a alimentação mineral do cafeeiro XXVII. Efeito da adubação N, P e K no teor de macro e micro nutrientes do fruto e na qualidade da bebida do café**. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, v. 30, p. 323-333, 1973.

ANDRADE, André Baldansi et al. **Fertilizing maize croppings with blends of slow/controlled-release and conventional nitrogen fertilizers**. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 184, n. 2, p. 227-237, 2021.

ANTILLE, D. L., Godwin, J., Sakrabani, R., Seneweera, S., Tyrrel, S. F., & Johnstron, A. E. (2017). Field-Scale Evaluation of Biosolids-Derived Organomineral Fertilizers Applied to Winter Wheat in England. *Agronomy Journal*, 109, 654–674.

ARROBAS, Margarida et al. **Controlled-release and stabilized fertilizers are equivalent options to split application of ammonium nitrate in a double maize-oats cropping system**. *Journal of Plant Nutrition*, p. 1-13, 2022.

AZEEM, Babar et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of controlled release**, v. 181, p. 11-21, 2014.

BENITES, V. de M. et al. **Produção de fertilizante organomineral granulado a partir de dejetos de suínos e aves no Brasil**. 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 8, de 11 de junho de 2003**. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, 13 jun. 2003. Seção 1, p. 8. Disponível em: < <https://abic.com.br/wp-content/uploads/2021/07/Instrucao-Normativa-08-03.pdf> > Acesso em: 23 ago. 2024.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) E CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (CNA). **PIB do agronegócio 2023**. Site. Disponível em: < <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> > Acesso em: 14 mai. 24.

- CHAGAS, W. F. T. et al. **Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system**. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 497-509, 2016.
- CHAGAS, W. F. T. **Tecnologias de fertilizantes nitrogenados na cafeicultura**. 2018. 139 p. Tese - Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2018.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Série histórica das safras de café: produção total (arábica e conilon)**. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/895-cafe-total-arabica-e-conilon>. Acesso em: 15 fev. 2025.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, Brasília, DF, v.11, n. 4, quarto levantamento, janeiro 2025a.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica – Custos – Café Arábica – 2003 a 2023**, 2023a. *Site*. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/798-cafe-arabica>>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica – Custos – Café Conilon – 2007 a 2023**, 2023b. *Site*. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao/planilhas-de-custo-de-producao/itemlist/category/799-cafe-conilon>>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- DA FONSECA, A.B. et al. **Urease inhibitors technologies as strategy to mitigate agricultural ammonia emissions and enhance the use efficiency of urea-based fertilizers**. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 22739, 2023.
- DA GRAÇA, C.H.; CALDAS, R.M.F.. **Estimativa da quantidade de resíduos (casca e polpa) produzidos durante o processo de beneficiamento do café no município de Varginha–MG**. *Revista Geonorte*, v. 8, n. 30, p. 104-117, 2017.
- DE ALMEIDA, Rodolfo Soares et al. **Reaproveitamento de resíduos de café em substratos para produção de mudas de *Joannesia princeps***. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 41, 2021.
- DE CARVALHO, A. M.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, L. L. **Emissão de óxido nitroso do solo com aplicação de fontes de fertilizantes nitrogenados em sistema de plantio direto no Cerrado**. Planaltina – DF. Embrapa Cerrados, 2010.
- DE LIMA, Tatiane Melo et al. **Adubação de milho crioulo com resíduos orgânicos em associação com *Azospirillum brasilense***. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 9, n. 2, p. 9-16, 2019.
- DE SOUZA, Taylor Lima et al. **Nitrogen fertilizer technologies: Opportunities to improve nutrient use efficiency towards sustainable coffee production systems**. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 345, p. 108317, 2023.
- DE SOUZA, A. C.; et al. **Big coffee vl.: seed desiccation tolerance, sieve classification, and physiological quality**. *Coffee Science - ISSN 1984-3909, [S. l.]*, v. 13, n. 4, p. 510–518, 2018.
- DOMINGHETTI, A. W. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro**. 2016. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

- DOMINGHETTI, Anderson William et al. **Perdas de nitrogênio por volatilização de fertilizantes nitrogenados em cultivo de café**. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 173-183, 2016.
- DUTRA, M. P. **Diagnóstico nutricional foliar e blends de fertilizantes de eficiência aumentada em cafeeiros em produção**. Dissertação. Lavras – MG. 76p. 2022.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Circular Técnica 6, p. 41. 2000. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/337672/1/Methododeanalisedetecido.pdf>>
- FAOSTAT, 2024. **Crops and livestock products, 2024**. *Site*. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- FAQUIN, Valdemar. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/Faepe, v. 183, 2005.
- FAVARIN, José Laércio et al. **Quality of coffee drink from fruits submitted to different post-harvest management practices**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, p. 187-192, 2004.
- FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE, USDA. **International Production Assessment Division, 2024**. *Site*. Disponível em: <<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/Default.aspx>>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- FREITAS, T. **Fertilizantes de liberação controlada e seus “blends” com ureia tratada com inibidor de urease para o cafeeiro**. 2020. 126 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.
- FREITAS, T. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada na cultura do cafeeiro: eficiência e custos**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- FREITAS, Tainah et al. **Technologies for Fertilizers and Management Strategies of N-Fertilization in Coffee Cropping Systems to Reduce Ammonia Losses by Volatilization**. *Plants*, v. 11, n. 23, p. 3323, 2022.
- FREITAS, Tainah et al. **Blending Controlled-Release and Urease-Inhibitor Technologies as Innovative Solutions to Reduce Ammonia Emissions in Coffee Environments**. *Soil Systems*, v. 7, n. 4, p. 83, 2023.
- FUFA, B.O., ETANA, M.B., AGA, M.C. **Review on Post-Harvest and Green Bean Coffee Processing in Ethiopia**. *Acta Scientific Agriculture* 3.7 (2019): 157-162
- GARCIA, A. L. A.; CARVALHO, C. H. S. de; GARCIA, A. W. R. **Extração de nutrientes em cafeeiros da espécie *Coffea arabica***. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa Cafeeiras, 34., 2008, Caxambú. Anais...Brasília, DF: Embrapa Café, 2009.
- GARRUTI, Ruth dos Santos; GOMES, Antônio Gentil. **Influence of ripening stage on the beverage quality of coffee from the Paraíba Valley**. *Bragantia*, v. 20, p. 989-995, 1961.
- GHUMMAN, Ali Shaan Manzoor et al. **Sulfur enriched slow-release coated urea produced from inverse vulcanized copolymer**. *Science of The Total Environment*, v. 846, p. 157417, 2022.

GHUMMAN, Ali Shaan Manzoor et al. **Synthesis and performance evaluation of slow-release fertilizers produced from inverse vulcanized copolymers obtained from industrial waste**. RSC advances, v. 13, n. 12, p. 7867-7876, 2023.

GONZÁLES VILLALBA, H. A., et al. **Fertilizantes nitrogenados: novas tecnologias**. Informações agronômicas, v. 148, p. 12-20, 2014.

GUELFY, D. **Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada**. Informações Agronômicas, Belo Horizonte, n. 157, p. 1-14, mar. 2017

GUERREIRO FILHO, O. et al. Café Arábica. In: AGUIAR, A. T. E. et al. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas: boletim 200**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2014. p. 90-104

HERNÁNDEZ LÓPEZ, Cristhian José. **Tecnologias de fertilizantes nitrogenados para lavouras cafeeiras: fertilizantes convencionais blend e organomineral**. 2024. 56p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024.

HÖFIG, Pedro et al. **Comportamento dos solos, produção de café e qualidade da bebida em dois sistemas de adubação usando fontes regionais e convencionais de nutrientes**. Caderno Pedagógico, v. 21, n. 6, p. e3898-e3898, 2024.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **19 plant nutrients for improving and protecting plant health**, 2020. *Infográfico*. Disponível em: <<https://www.fertilizer.org/resource/19-plant-nutrients-for-improving-and-protecting-plant-health/>> Acesso em: 03 jun. 2023.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Chapter 11: N<sub>2</sub>O emissions from managed soils, and CO<sub>2</sub> emissions from lime and urea application. 2006. v.4. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_11\\_Ch11\\_N2O&CO2.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf)

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. p. 2391. Cambridge: Cambridge University. 2023.

ISO, 2016. Fertilizers and soil conditioners — Controlled-release fertilizer — General requirements, in: ISO 18644:2016.

JIANG, Jingyan et al. **Assessment of reactive nitrogen mitigation potential of different nitrogen treatments under direct-seeded rice and wheat cropping system**. Environmental Science and Pollution Research, v. 25, p. 20241-20254, 2018.

JIANG, Zeyin et al. **Combined application of coffee husk compost and inorganic fertilizer to improve the soil ecological environment and photosynthetic characteristics of arabica coffee**. Agronomy, v. 13, n. 5, p. 1212, 2023.

KAFARSKI, P. & TALMA, M. **Recent advances in design of new urease inhibitors: A review**. J. Adv. Res. 13, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.01.007> (2018)

KASHYAP, N., CHOUDHARI, B., SINGH, B. P. **A review on management of urea fertilizer to minimize losses of nitrogen from rice fields.** International Journal of Research in Agronomy, 2019.

KAUR, N., HUI, D., RICCUITO, D.M. *et al.* **Response patterns of simulated corn yield and soil nitrous oxide emission to precipitation change.** *Ecol Process* **12**, 17 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13717-023-00429-w>

KRISHNA, K. V.; SHIVAJI, K. P. **Physical and Engineering Properties of Fertilizers and their Combination for the Design of Hopper.** Current Journal of Applied Science and Technology, v. 40, n. 43, p. 29-35, 2021.

LANGONI, Jéssica Alves et al. **Produtividade de cafeeiros fertirrigados sob diferentes níveis de adubação na região do cerrado mineiro na primeira safra.** Revista de Ciências Agro-Ambientais, v. 17, n. 1, p. 1-7, 2019.

LARA-CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; SANTANA, D.G.; GASCHO, G.J. **Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers.** *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1999, **30**, 389–406.

LAVIOLA, B. G. et al. **Influência da adubação na formação de grãos moca e no tamanho de grãos de café (Coffea arabica L.).** Coffee Science, Lavras, v. 1. n. 1, p. 36-42, 2006.

LAWRENCE, D. et al. **Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release.** *Plants* **10**, 238. <https://doi.org/10.3390/plants10020238> (2021).

LIU, Lei et al. **Challenges for global sustainable nitrogen management in agricultural systems.** Journal of agricultural and food chemistry, v. 68, n. 11, p. 3354-3361, 2020.

LIU, Limin et al. **Sustainable and biodegradable copolymers from SO<sub>2</sub> and renewable eugenol: a novel urea fertilizer coating material with superior slow release performance.** *Macromolecules*, v. 53, n. 3, p. 936-945, 2020.

MALAVOLTA, E; MORAES, MF de. **O nitrogênio na agricultura brasileira.** CETEM: Série de Estudos e Documentos, SED-70, 2006.

MALTA, M.R.; NOGUEIRA, F.D.; GUIMARÃES, P.T.G. **Chemical composition, yield and quality of the fertilized coffee with different sources and doses of nitrogen.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 27, p. 1246-1252, 2003.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 61, de 08 de julho de 2020.** Diário Oficial da União, Brasil, 15 jul. 2020.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Manual de métodos analíticos oficiais de fertilizantes, corretivos, substratos, condicionadores e remineralizadores de solo.** Brasília – DF. 2023.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações.** São Paulo, Futurama Editora, 2016, 1 ed. 584p., 2015.

MAZZETTO, Andre M. et al. **Region-specific emission factors for Brazil increase the estimate of nitrous oxide emissions from nitrogen fertiliser application by 21%.** *Atmospheric Environment*, v. 230, p. 117506, 2020.

MOREIRA, D. T. et al. **Determination of physical and chemical quality of coffee beans under improved potassium fertilization managements.** 2021.

<https://doi.org/10.25186/cs.v16i.1895>

MOTA, Murilo Renan et al. **Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 2, p. 512-522, 2015.

MOURA, A.E.S.S., et al. **Avaliação da precipitação interna em cultivo de café em bacia representativa no Estado de Pernambuco.** Water resources and Irrigation Management. v.3, n.1, p.21-29, Jan.-Abr., 2014

MUMBACH, Gilmar L. et al. **Agronomic efficiency of organomineral fertilizer in sequential grain crops in southern Brazil.** Agronomy Journal, v. 112, n. 4, p. 3037-3049, 2020.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E; SOUZA NETTO, G.J.M.; MACHADO, B.A.; MIRA, A.B. **Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw.** Revista Ciência Agronômica 48, p. 413-418, 2017. < <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170048>>

PEREIRA VV, MORALES MM, PEREIRA DH, DE REZENDE FA, DE SOUZA MAGALHÃES CA, DE LIMA LB, MARIMON-JUNIOR BH, PETTER FA. **Activated Biochar-Based Organomineral Fertilizer Delays Nitrogen Release and Reduces N<sub>2</sub>O Emission.** *Sustainability*. 2022; 14(19):12388. <https://doi.org/10.3390/su141912388>

QUAGGIO, J. A., THOMAZIELLO, R. A., van Raij, B., CANTARELLA, H. Café. In: CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A., MATTOS Jr. D., BOARETTO, R. M., van Raij, B. **BOLETIM 100: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico, 2022, p. 165-176.

RODELLA, A.A.; ALCARDE, J.C. **Requisitos de qualidade física e química de fertilizantes minerais.** GONÇALVES, JL de M.; BENEDETTI, V. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p. 59-78, 2000.

RODRIGUES, J. O. et al. **Volatilização de amônia de ureias protegidas na cultura do cafeeiro conilon.** Coffee Science, Lavras, v. 11, n. 4, p. 530-537, out./dez. 2016.

RUTLAND, David W. **Granule Crushing strenght S-115.** in Manual for determining physical properties of fertilizer. International Fertilizer Development Center, 1986. p. 51-52.

SAMPAIO, J.B.R. **Colheita e preparo do café brasileiro: aspectos qualitativos.** Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1993. 21p.

SARKIS, Leonardo Fernandes et al. **Ammonia volatization from conventional and stabilized fertilizers, agronomic aspects and microbiological attributes in a Brazilian coffee crop system.** *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1291662, 2023a.

SARKIS, Leonardo Fernandes et al. **Nitrogen fertilizers technologies as a smart strategy to mitigate nitrous oxide emissions and preserve carbon and nitrogen soil stocks in a coffee crop system.** *Atmospheric Environment: X*, v. 20, p. 100224, 2023b.

SCAA. Specialty Coffee Association Of America. **Protocolo para Análise Sensorial de Café- Metodologia SCAA.**Doc. V- Português e. Rev. Dez 2008. 13p.

- SCABELO, C. B. **Comparações de fatores que interferem na qualidade do café: uma análise estatística não paramétrica**. Monografia. Instituto Federal do Espírito Santo, Venda Nova dos Imigrantes – ES. 2024. 51p.
- SCHULZE, D. **Measuring powder flowability: A comparison of test methods-Part II**. Powder and Bulk Engineering, v. 10, p. 17-33, 1996.
- SHIMIZU, G. D., MARUBAYASHI, R. Y. P. AND GONÇALVES, L. S. A. (2024). **AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences. R package version 1.3.6**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/AgroR/index.html>
- SILVEIRA, J.M.C et al. Produção e tamanho de grãos de café Coffea Arabica L.(CV OBATÃ) sob fertirrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 9, n. 4, p. 204-210, 2015.
- SOBREIRA, F. M. et al. **Tamanho dos grãos de café arábica, após esqueletamento, na Região do Caparaó-ES**. In: Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 44., 2018, Franca, SP. Nosso café, melhorado desde o pé: anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2018.
- SOARES, Danilo de Araujo. **Emissões de gases de efeito estufa por fertilizantes nitrogenados em lavoura cafeeira irrigada**. 2016. UFLA, Lavras – MG. 128p.
- SOUZA, T. L. de. **Fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados na cafeicultura: análises agronômicas, de qualidade, ambientais e econômica**. 2019. 152 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- TIMILSENA, Y. P. et al. **Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns**. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2014.
- TRAN, T. et al. **Study on septic sludge utilization to coordinate with agricultural wastes to produce compost fertilizer**. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012089.
- TRENKEL, M. E. **Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. 167 p.
- UCHIDA, Yoshitaka; VON REIN, Isabell. **Mitigation of nitrous oxide emissions during nitrification and denitrification processes in agricultural soils using enhanced efficiency fertilizers**. Soil contamination and alternatives for sustainable development, v. 10, 2018.
- UDDIN, M.K.; Yeasmin, S.; Mohiuddin, K.M.; Chowdhury, M.A.H.; Saha, B.K. **Peat-Based Organo-Mineral Fertilizer Improves Nitrogen Use Efficiency, Soil Quality, and Yield of Baby Corn (Zea mays L.)**. *Sustainability* 2023, 15, 9086. <https://doi.org/10.3390/su15119086>
- VALADARES, Samuel Vasconcelos et al. **Produtividade e bienalidade da produção de cafezais adensados, sob diferentes doses de N e K**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 48, p. 296-303, 2013.
- VEGRO, C.L.R.; DE CARVALHO, F. C. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café**. Instituto de Economia Agrícola. 1994.
- VEJAN, P. et al. **Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture**. Journal of Controlled Release, v. 339, p. 321-334, 2021.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p.

YANG, Liuqing et al. **How nitrification-related N<sub>2</sub>O is associated with soil ammonia oxidizers in two contrasting soils in China?** Science of the Total Environment, v. 770, p. 143212, 2021.

XU, Guohua; FAN, Xiaorong; MILLER, Anthony J. **Plant nitrogen assimilation and use efficiency**. Annual review of plant biology, v. 63, p. 153-182, 2012.

ZHANG, Xin et al. **Agricultural sustainable intensification improved nitrogen use efficiency and maintained high crop yield during 1980–2014 in Northern China**. Science of the Total Environment, v. 596, p. 61-68, 2017.

ZHANG, L. et al. **Integrated assessment of agronomic, environmental and ecosystem economic benefits of blending use of controlled-release and common urea in wheat production**. Journal of Cleaner Production, v. 287, p. 125572, 2021a.

ZHANG, H. et al. **Precipitation and nitrogen application stimulate soil nitrous oxide emission**. Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 120, n. 3, p. 363-378, 2021b.