

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA DA SILVA GIARETTA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE MAIOR EFICIÊNCIA PARA UMA
AGRICULTURA DE ALTA PRODUTIVIDADE NA REGIÃO SUBTROPICAL
BRASILEIRA**

DOIS VIZINHOS

2026

ANA PAULA DA SILVA GIARETTA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE MAIOR EFICIÊNCIA PARA UMA
AGRICULTURA DE ALTA PRODUTIVIDADE NA REGIÃO SUBTROPICAL
BRASILEIRA**

**High-efficiency nitrogen fertilizers for high-productivity agriculture in the
Brazilian subtropical region**

Trabalho de conclusão de Dissertação apresentada
como requisito para obtenção do título de Mestre em
Ciências Agrárias - Programa de Pós-graduação em
Agroecossistemas da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná -Dois Vizinhos (UTFPR-DV).
Orientador: Prof. Dr. Laércio Ricardo Sartor

DOIS VIZINHOS

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Dois Vizinhos



ANA PAULA DA SILVA GIARETTA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE MAIOR EFICIÊNCIA PARA UMA AGRICULTURA DE ALTA
PRODUTIVIDADE NA REGIÃO SUBTROPICAL BRASILEIRA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como
requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências
Agrárias da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR). Área de concentração: Agroecossistemas.

Data de aprovação: 03 de Março de 2026

Dr. Laercio Ricardo Sartor, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Caroline Amadori, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Utfpr)

Dr. Itacir Eloi Sandini, Doutorado - Universidade Estadual do Centro Oeste (Unicentro)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 03/03/2026.

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e por ter me concedido força, sabedoria e perseverança ao longo de toda essa trajetória. Sua presença foi fundamental nos momentos de desafio, guiando minhas escolhas e sustentando minha fé para que este trabalho pudesse ser concluído.

Aos meus pais, Angelina e Laercio Giaretta, expresso minha profunda gratidão por todo o amor, apoio incondicional e incentivo ao longo da minha formação pessoal e acadêmica. Ao meu namorado Carlos, agradeço a compreensão, paciência, companheirismo e apoio constante, fundamentais para que eu segua firme durante este percurso.

Ao meu orientador, professor Laércio, agradeço a orientação, dedicação, confiança e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do desenvolvimento desta dissertação. Estendo meus agradecimentos ao grupo de pesquisa, em especial à pós-doutoranda Caroline, pela colaboração, apoio científico e contribuições que enriqueceram este trabalho.

Agradeço também às amizades construídas ao longo do mestrado, que tornaram essa jornada mais leve, enriquecedora e significativa. O convívio, as trocas de conhecimento, o apoio nos momentos desafiadores e os bons momentos compartilhados foram fundamentais para minha permanência e crescimento durante essa etapa. Em especial, agradeço à Bruna Silveira, pela amizade, companheirismo, incentivo e apoio constante, que fizeram toda a diferença ao longo dessa caminhada.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistema (PPGSIS) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Câmpus Dois Vizinhos, pela oportunidade de formação, pela estrutura oferecida e pelo ambiente acadêmico que possibilitou meu crescimento profissional e científico.

Por fim, agradeço à empresa Yara, pelo apoio e pela contribuição para minha experiência profissional, bem como ao meu supervisor Guilherme Baggio, pela confiança, incentivo e aprendizado proporcionados, que foram essenciais para minha trajetória profissional paralelamente ao desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) apresenta elevada exigência por nitrogênio (N), sendo este macronutriente essencial para o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura, especialmente em sistemas agrícolas intensivos. Entretanto, a eficiência do uso do N é frequentemente reduzida por perdas associadas à volatilização de amônia, o que influencia no retorno econômico da adubação e aumenta os impactos ambientais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar, ao longo de três safras consecutivas (2022/23, 2023/24 e 2024/25), a eficiência de uso do nitrogênio e as perdas por volatilização de amônia de diferentes fontes nitrogenadas aplicadas na cultura do milho, em sistema de plantio direto, na região subtropical brasileira. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho distrófico, no município de Dois Vizinhos – PR, utilizando delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em ureia, ureia tratada com inibidor de urease NBPT, nitrato de amônio e nitrato de amônio com 70% da dose recomendada e um tratamento controle, sem aplicação de N. Foram avaliados o rendimento de grãos, a produção de biomassa, a extração e exportação de nitrogênio, a eficiência de uso do nutriente e as perdas de N por volatilização de amônia. Os resultados demonstraram que a adubação nitrogenada promoveu incrementos significativos na produtividade do milho em relação ao controle. O nitrato de amônio, especialmente na dose reduzida, apresentou maior eficiência de uso do N e menores perdas por volatilização. A ureia tratada com NBPT reduziu parcialmente as perdas em comparação à ureia convencional, porém manteve volatilização superior ao nitrato de amônio. Conclui-se que o uso de fontes nitrogenadas de maior eficiência, aliado à otimização da dose aplicada, constitui estratégia agronomicamente eficiente e ambientalmente sustentável para a cultura do milho em regiões subtropicais.

Palavras chaves: adubação nitrogenada; eficiência de fertilizante; milho; volatilização.

ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) has a high nitrogen (N) requirement, this macronutrient being essential for crop growth, development, and productivity, especially in intensive agricultural systems. However, the efficiency of N use is frequently reduced by losses associated with ammonia volatilization, which influences the economic return of fertilization and increases environmental impacts. In this context, the present work aimed to evaluate, over three consecutive growing seasons (2022/23, 2023/24, and 2024/25), the nitrogen use efficiency and ammonia volatilization losses of different nitrogen sources applied to corn under no-till farming in the Brazilian subtropical region. The experiment was conducted in a dystrophic Red Latosol in the municipality of Dois Vizinhos – PR, using a randomized block design with four replications. The treatments consisted of urea, urea treated with the urease inhibitor NBPT, ammonium nitrate, and ammonium nitrate at 70% of the recommended dose, and a control treatment without nitrogen application. Grain yield, biomass production, nitrogen extraction and export, nutrient use efficiency, and nitrogen losses due to ammonia volatilization were evaluated. The results demonstrated that nitrogen fertilization promoted significant increases in corn productivity compared to the control. Ammonium nitrate, especially at the reduced dose, showed greater nitrogen use efficiency and lower volatilization losses. Urea treated with NBPT partially reduced losses compared to conventional urea, but maintained higher volatilization than ammonium nitrate. It is concluded that the use of more efficient nitrogen sources, combined with optimization of the applied dose, constitutes an agronomically efficient and environmentally sustainable strategy for maize cultivation in subtropical regions.

Keywords: nitrogen fertilization; fertilizer efficiency; corn; volatilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do experimento.....	21
Figura 2 - Croqui do experimento, nos três anos, com a disposição das parcelas e seus respectivos tratamentos. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2023.....	22
Figura 3 - Plantio do milho sobre palhada de aveia preta. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.	23
Figura 4 - Aplicação da adubação nitrogenada no milho em estágio V5. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.....	23
Figura 5 - Aplicação das fontes minerais nas bases (A) e câmaras de PVC utilizadas para as coletas (B). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.....	24
Figura 6 - Identificação da esponja após coleta. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.....	25
Figura 7 - Processo de destilação da amônia (A) e titulação da solução (B). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.....	27
Figura 8- Perda diária de amônia e perda acumulada de amônia na safra 2022/23 de diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	30
Figura 9- Precipitação e temperatura média da safra 2022/2023, UTFPR Campus Dois Vizinhos.	30
Figura 10- Perda diária e acumulada de amônia na safra 2023/24 de fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	31
Figura 11 - Precipitação e temperatura média do município de Dois Vizinhos, UTFPR, na safra 2023/24, durante o período de xx/xx/xx (semeadura do milho) a xx/xx/xx (colheita do milho).	31
Figura 12 - Perda diária de amônia e perda acumulada de amônia na safra 2024/25 de diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	33
Figura 13- Precipitação e temperatura média do município de Dois Vizinhos, UTFPR, na safra 2024/25.....	33
Figura 14 - Biomassa dos grãos (A), biomassa Planta-Grãos (B) e biomassa total do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	34
Figura 15 - Extração de N, P+E+S (A) e Extração total de N do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	35
Figura 16 -Exportação de N no grão do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a fontes de adubação nitrogenada nas safras 2022/23, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2026	37
Figura 17 - Carbono na biomassa total e carbono na palha do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026	38
Figura 18 - Eficiência de N (A), rendimento de grãos (B), eficiência do N (Kg de grãos por Kg de N aplicado) (C) do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do solo (0-10 e 10-20 cm) no início do experimento em setembro de 2022. UTFPR, Campus Dois Vizinhos- PR, 2025	22
--	-----------

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	13
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	CULTURA DO MILHO E SUA IMPORTÂNCIA NO BRASIL	14
2.2	MANEJO NUTRICIONAL DA CULTURA DO MILHO	14
2.3	IMPORTÂNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO	15
2.4	FONTES COMERCIAIS DE NITROGÊNIO E SUAS EFICIÊNCIAS	16
3.	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	CARATERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	21
3.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS AVALIADOS	22
3.3	MANEJO DA CULTURA DE MILHO	22
3.4	AVALIAÇÃO DA VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA	24
3.5.1	Extração, destilação e titulação da amônia.....	25
3.6	AVALIAÇÕES DE RENDIMENTO DE GRÃOS, DA BIOMASSA E DO TEOR DE N DA CULTURA DO MILHO 27	
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	28
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	VOLATILIZAÇÃO	29
4.2	BIOMASSA.....	34
4.3	EXTRAÇÃO DE N.....	35
4.4	EXPORTAÇÃO DE N.....	36
4.5	CARBONO	37
4.6	EFICIÊNCIA DE N.....	38
5.	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays L.*) tem se consolidado como um dos pilares da agricultura brasileira, não apenas por seu elevado valor econômico, mas também por sua versatilidade no fornecimento de grãos para alimentação humana, ração animal, matérias-primas para biocombustíveis e indústria (Duarte et al., 2022; FAO, 2021). O Brasil toma posição entre os maiores produtores e exportadores mundiais do cereal, com 141,7 milhões de toneladas no último ano, marcando uma safra recorde, segundo dados do IBGE (2025). Esse avanço é impulsionado por investimentos tecnológicos, dentre os quais se destaca o manejo nutricional com foco no nitrogênio, elemento fundamental para o desempenho fisiológico da planta e para a formação do rendimento de grãos (Canterella et al., 2018; Coelho et al., 2023).

O nitrogênio é o nutriente mineral mais demandado da cultura do milho, pois está atuando diretamente em todo ciclo, desde o desenvolvimento vegetativo, formação de grãos, até a produtividade final (Gleith et al., 2022). Segundo Kitchen et al. (2020), o manejo eficiente da adubação nitrogenada é essencial para otimizar o aproveitamento do nutriente, minimizar perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação.

A cultura do milho apresenta elevada exigência de nitrogênio, com extrações típicas em torno de 150–160 kg ha⁻¹ de N para produtividades médias (~6 t/ha de grãos), podendo ultrapassar 200 kg ha⁻¹ de N em lavouras de alto potencial de rendimento (Sangoi; Almeida, 1994; Coelho, 2007). Grande parte dessa demanda, aproximadamente 70%, concentra-se no período crítico entre o estágio de ~6 folhas e o florescimento, quando a planta define sua necessidade de N, evidenciando a importância do suprimento adequado nesse intervalo (Coelho, 2007).

O uso de fertilizantes nitrogenados no Brasil é expressivo, o país figura entre os maiores consumidores mundiais (4º lugar), respondendo por cerca de 4% do consumo global de N, com aproximadamente 4,7 milhões de toneladas de N utilizadas em 2019 (IFA, 2019; ANDA, 2022). As principais fontes de N no mercado brasileiro incluem a ureia (fertilizante mais utilizado, responsável por cerca de 72% do nitrogênio fornecido), o nitrato de amônio, o sulfato de amônio e formulações especiais como ureia tratada com inibidor de urease, visando reduzir perdas (Maliszewski, 2022; Canteralla, 2016).

Devido à capacidade doméstica limitada, o país produz internamente apenas ~8% do N que consome (FAO, 2023), cerca de 90% dos fertilizantes nitrogenados são

importados. Os principais fornecedores externos incluem países como a Rússia, que nos últimos anos foi responsável por aproximadamente 17% da ureia importada pelo Brasil e praticamente 98% do nitrato de amônio importado (Maliszewski, 2022; FAO, 2023). O custo das fontes nitrogenadas é bastante influenciado pelo mercado internacional e apresentou forte volatilidade recente. Entre 2021 e 2022, por exemplo, o preço internacional da ureia mais que dobrou (aumento de >100%), e o do nitrato de amônio também aproximadamente duplicou, reflexo de restrições de oferta global e alta no preço do gás natural, principal insumo para produção de N (Maliszewski, 2022; Wold Bank, 2022).

Em condições normais de mercado, a ureia costuma apresentar preço na faixa de US\$ 300–500 por tonelada (CFR Brasil), porém atingiu níveis recordes em 2022 devido ao choque de oferta internacional. Do ponto de vista da rentabilidade, os fertilizantes nitrogenados representam um componente considerável no custo de produção do milho, estimativas indicam que os fertilizantes chegam a responder por cerca de 20–25% dos custos totais da lavoura (CONAB, 2024), de modo que preços elevados ou uso ineficiente de N podem reduzir significativamente as margens do produtor.

Além disso, o manejo inadequado traz riscos de perdas econômicas: parte do nitrogênio aplicado pode não ser aproveitado pela planta e se perder do sistema (por volatilização de amônia, lixiviação, emissão de óxido nitroso etc.), implicando desperdício de fertilizante. Estudos mostram que, em aplicações superficiais de ureia sem incorporação, normalmente 15–30% do N pode volatilizar, podendo em condições extremas atingir até 50–60% de perda se o solo estiver úmido, quente e sem chuva pós-aplicação (Cantarella, 2016). O uso de tecnologias como ureia com inibidor de urease (por exemplo, NBPT) mitiga esse problema, esses aditivos podem reduzir as perdas por volatilização em 60%, aumentando a eficiência de utilização do N (Canteralla, 2016). Portanto, a adoção de práticas de adubação nitrogenada eficientes (doses adequadas, fontes apropriadas e aplicação nos estádios críticos) é fundamental para maximizar a produtividade e a rentabilidade do milho, minimizando os riscos financeiros associados ao uso ineficiente do nitrogênio.

Sabendo disso, o uso de tecnologias como inibidores de urease (ex.: NBPT) e de nitrificação, além de fertilizantes de liberação controlada, tem se destacado como estratégia eficaz para mitigar perdas, melhorar a eficiência agrônômica e aumentar o

retorno econômico do investimento em nitrogênio (Pereira et al., 2023; Gleith et al., 2022; Kitchen et al., 2020).

Dessa forma, este trabalho propõe-se a avaliar comparativamente diferentes fontes comerciais de nitrogênio, com ênfase em sua eficiência agronômica e capacidade de maximizar a produtividade da cultura do milho, contribuindo para um manejo mais rentável e tecnicamente sustentável.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho, em três safras, de parâmetros agronômicos de fontes nitrogenadas aplicadas na cultura do milho, com foco na eficiência de uso do nitrogênio, visando identificar estratégias de adubação que promovam a maior eficiência de uso do nitrogênio e menor perdas por volatilização.

1.2.2 Objetivos específicos

Comparar o efeito de ureia, ureia +NBPT e nitrato de amônio na produtividade de grãos e na biomassa total da cultura do milho durante as três safras.

Estudar a volatilização de amônia (NH_3) de ureia, ureia + NPBT e nitrato de amônio.

Determinar a eficiência de uso do nitrogênio em três safras para cultura do milho recebendo ureia, ureia + NPBT e nitrato de amônio

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do milho e sua importância no Brasil

A cultura do milho (*Zea mays L.*) foi introduzida no Brasil durante o período colonial, vinda junto com colonizadores europeus, principalmente os portugueses, que incorporaram o cereal à agricultura local, sendo apenas cultura de subsistência na época. Embora esta informação exista, há alguns registros arqueobotânicos e etnobotânicos que indicam que povos indígenas já cultivavam o milho em terras brasileiras antes da chegada dos europeus (Galvão et al., 2015).

Atualmente, o Brasil é um dos principais produtores e exportadores mundiais do cereal, sendo uma combinação de avanços tecnológicos, políticas agrícolas e expansão da segunda safra (safrinha), tornando o milho como uma das bases da segurança alimentar e energética do país (Silva et al., 2023).

A cultura do milho em solos brasileiros performa-se bem em virtude da elevada adaptabilidade da cultura às condições edafoclimáticas do país. Esta cultura apresenta ampla plasticidade genética, o que permite seu cultivo em diferentes tipos de solo e clima, desde regiões tropicais até subtropicais, favorecendo sua expansão territorial (Silva et al., 2023).

Na safra 2024/25, o IBGE estimou uma produção recorde de 130,8 milhões de Mg de milho em grão, representando um aumento de 11,8% em relação à safra anterior. Esse crescimento foi impulsionado pelo aumento da área colhida (3,2%) e da produtividade média, que alcançou 5.834 kg/ha (+8,6%). A segunda safra, foi responsável por cerca de 80% da produção total, reforçando sua importância no cenário nacional (IBGE, 2025).

Sendo assim, a cultura do milho desempenha atuação importante na economia agrícola brasileira, sendo uma das principais *commodities* em volume de produção e valor de mercado. De acordo com Silva et al. (2023), o milho constitui os pilares da segurança alimentar e energética nacional, influenciando diretamente o preço de proteínas animais e o custo de produção agroindustrial. Além disso, a produção está crescendo na segunda safra, permitindo o uso mais eficiente da terra e a intensificação sustentável dos sistemas produtivos, sem necessidade de expansão da fronteira agrícola (Moura et al., 2022).

2.2 Manejo nutricional da cultura do milho

O manejo nutricional eficiente do milho é essencial para atingir altos tetos produtivos e manter a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, especialmente devido à alta exigência da cultura em macronutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), e de micronutrientes especialmente de zinco (Zn), boro (B), manganês (Mn) e cobre (Cu), que participam de processos fisiológicos vitais como a fotossíntese, síntese de proteínas e desenvolvimento reprodutivo (Alloway, 2008; Cakmak, 2008). Pesquisas concluíram que a deficiência de micronutrientes, mesmo em solos com bom suprimento de macronutrientes, pode limitar significativamente o potencial produtivo da cultura (Singh et al., 2020).

O nitrogênio é o nutriente mais demandado pela planta, suas funções estão diretamente relacionadas a taxa fotossintética, o crescimento vegetativo e a formação de grãos (Ciampitti & VYN, 2014). O fósforo, tem como função dar o aporte de ATPs desde os estágios iniciais do desenvolvimento, promovendo o enraizamento e a eficiência energética das células, atuando também no equilíbrio hídrico, na resistência a estresses e no enchimento de grãos (Moll et al., 2023). Já o potássio, desempenhando funções vitais no metabolismo vegetal, como a regulação osmótica, ativação enzimática e transporte de açúcares (Romheld & Kirkby, 2010).

Estas informações só reforçam que a aplicação da Lei dos Mínimos de Liebig na cultura do milho reforça a necessidade de um manejo nutricional equilibrado, em que o nutriente presente em menor disponibilidade limita o pleno desenvolvimento da planta, independentemente do suprimento dos demais (Ramalho et al., 2022; Zorb et al., 2014).

2.3 Importância da adubação nitrogenada na cultura do milho

A adubação nitrogenada é um dos alicerces da nutrição do milho, sendo o N, o nutriente mais requerido pela cultura ao longo de seu ciclo. Ele desempenha funções centrais no metabolismo da planta, como a síntese de proteínas, enzimas e clorofila, afetando diretamente o crescimento vegetativo, a fotossíntese e, consequentemente, a formação e enchimento dos grãos (Ciampitti & Vyn, 2013; Coelho et al., 2022).

Em média, a planta de milho acumula de 150 a 300 kg ha⁻¹ de N ao longo do ciclo, sendo que 60% a 70% desse total é absorvido até o estágio de florescimento (R1) (Ciampitti & Vyn, 2013). O teor de N varia entre os compartimentos da planta: nos grãos, encontra-se entre 1,2% e 1,6%, enquanto na parte aérea (folhas, colmo e palha), os

valores oscilam de 0,8% a 2,5% na matéria seca (Fageria et al., 2014). Deste total, cerca de 60% a 65% é exportado pelos grãos, o que equivale a aproximadamente 15 kg de N por tonelada colhida (Coelho et al., 2022).

As doses de N recomendadas variam conforme a expectativa de produtividade, o teor de matéria orgânica do solo e o histórico de manejo da área, podendo ir de 100 a 250 kg ha⁻¹ de N em sistemas de alta performance (Coelho et al., 2022). A quantidade de N disponível no solo no início do ciclo é geralmente insuficiente para atender às exigências da cultura, especialmente em solos tropicais intemperizados, com baixo teor de matéria orgânica.

Por isso, é comum realizar a aplicação parcelada, com parte da dose no plantio ou pré-plantio e o restante em cobertura, entre os estádios V4 e V8, fase em que ocorre o pico de absorção de N (Ciampitti & Vyn, 2013). A escolha da fonte e o momento da aplicação são fundamentais para reduzir perdas por volatilização e lixiviação, aumentando a eficiência de uso do nutriente e garantindo maior produtividade e sustentabilidade.

A deficiência de N durante estágios críticos como o V6 a R1 pode comprometer o potencial produtivo, enquanto o excesso pode gerar perdas por volatilização, lixiviação e emissão de gases de efeito estufa, além de aumentar os custos de produção (Silva et al., 2021). Por isso, estratégias como parcelamento da dose, uso de inibidores de urease ou nitrificação, fontes de liberação controlada e aplicação conforme a expectativa de produtividade e análise de solo, são recomendadas para melhorar a eficiência de uso do N e reduzir impactos ambientais (Roth et al., 2022).

A eficiência do uso do nitrogênio (EUN) pode ser aumentada com a adoção de boas estratégias que envolvem o uso de tecnologias, o momento adequado, a forma e o local da aplicação dos fertilizantes. A aplicação parcelada, dividindo o N entre o plantio e os estádios de maior demanda (V4 a V8), é uma prática consolidada para alinhar a oferta com a absorção pela planta e reduzir perdas por lixiviação e volatilização (Roth et al., 2022).

Vale ressaltar ainda que, a EUN geralmente inferior a 50% nos sistemas convencionais, implica tanto os retornos econômicos quanto a sustentabilidade ambiental (Liu et al., 2022).

2.4 Fontes comerciais de nitrogênio e suas eficiências

As fontes de nitrogênio são classificadas em amídicas, nítricas e amoniacais, cada uma com diferentes formas de liberação e susceptibilidade a perdas. A ureia (UR) (46% de N) é a fonte mais utilizada no Brasil, por seu baixo custo e alta concentração, mas apresenta elevado risco de volatilização de amônia, especialmente quando aplicada na superfície e sem incorporação (Cantarella et al., 2018).

Já o nitrato de amônio (NA) (27 a 33% de N) combina formas nítrica e amoniacal, proporcionando absorção rápida e sem volatilização (Roth et al., 2022). E o sulfato de amônio (21% de N e 24% de S) é proveitoso pois fornece enxofre junto ao N, favorecendo a síntese proteica e reduzindo perdas em solos ácidos, embora promova à acidificação do solo (Roth et al., 2022).

Além dessas, tecnologias como a ureia com inibidor de urease (ex.: NBPT) ou com inibidor de nitrificação (ex.: DCD) e fertilizantes de liberação controlada vêm sendo adotadas para aumentar a eficiência de uso do N, reduzindo perdas por volatilização e lixiviação e melhorando a sincronização com a demanda da planta (Hijazi et al., 2023; Cantarella et al., 2018). É importante ressaltar que, a escolha da fonte deve ser feita com base no tipo de solo, clima, sistema de cultivo e viabilidade econômica.

2.4.1 Comparações entre fontes

O nitrato de amônio (27-00-00), a ureia comum e a ureia tratada com NBPT diferem em eficiência agronômica no milho em relação às perdas de nitrogênio, produtividade, custo e disponibilidade. A ureia é a fonte de N mais utilizada no Brasil, representando cerca de 60% do total aplicado, devido ao seu alto teor de N (45%) e ao menor custo por unidade do nutriente (Souza et al., 2020). No entanto, quando aplicada em cobertura sem incorporação ao solo, a ureia pode sofrer perdas por volatilização de amônia que chegam a até 46% do N aplicado (Santos et al., 2021). Para reduzir essas perdas, a ureia tratada com inibidor de urease NBPT (N-(n-butil)tiofosfóricotriamida) retarda a hidrólise da ureia, diminuindo a emissão de NH_3 em cerca de 30% a 50% em comparação à ureia comum, resultando em maior eficiência agronômica (Cassim et al., 2021; Pan et al., 2016).

Esse aumento de eficiência geralmente se traduz em maior absorção de N e produtividade do milho, especialmente sob doses elevadas ou em ambientes de maior risco de perda (Frazão et al., 2014). Já o nitrato de amônio, que contém N nas formas nítrica e amoniacal, praticamente elimina as perdas por volatilização, sendo sua

emissão de NH_3 até 80% menor que a da ureia convencional (Sazurada et al., 2022). Em experimento conduzido no sul do Brasil, o uso de nitrato de amônio elevou significativamente a produtividade do milho, quando comparado à ureia comum, devido à maior eficiência de aproveitamento do N aplicado (Sakurada et al., 2022).

Apesar disso, o nitrato de amônio apresenta custo por unidade de N mais elevado e sua comercialização é restrita no Brasil, devido à necessidade de controle legal por seu potencial explosivo (Cantarella et al., 2018). A ureia com NBPT, por sua vez, apresenta custo modestamente superior à ureia comum, cerca de 12% a mais, mas proporciona incrementos de produtividade que compensam essa diferença. Souza et al. (2020) relataram aumento na receita bruta de US\$ 78 por hectare no milho em relação à ureia comum.

A ureia comum, por ser altamente solúvel e rapidamente hidrolisada no solo, está sujeita a perdas significativas de nitrogênio por volatilização de amônia (NH_3) quando aplicada em superfície. Em condições tropicais, essas perdas podem atingir 40–50% do N aplicado (Lam et al., 2018), reduzindo a eficiência do fertilizante e causando impactos ambientais como acidificação do solo, material particulado atmosférico e emissões indiretas de N_2O (Thapa & Chatterjee, 2017). A ureia protegida, seja tratada com inibidor de urease (ex. NBPT) ou revestida com polímeros, foi desenvolvida para mitigar essas perdas. Estudos de campo demonstram que a adição de NBPT à ureia pode reduzir a volatilização de NH_3 em mais de 50% em comparação à ureia não tratada (Souza et al., 2020). Nos primeiros dias após a adubação, a redução pode ser ainda mais drástica: Cancian et al. (2025) observaram que a ureia + NBPT diminuiu as perdas de NH_3 entre 83% e 88% em relação à ureia comum, dependendo do tipo de solo, nos cinco dias iniciais após a aplicação. Essa menor perda por volatilização se traduz em maior retenção de N no solo na forma de amônio, proporcionando mais nitrogênio disponível para a cultura absorver em vez de se perder para a atmosfera (Zhu et al., 2020).

Do ponto de vista agrônômico, a ureia estabilizada tende a aumentar a eficiência de uso do N e a produtividade das culturas em comparação com a ureia comum, sobretudo em situações de alto potencial de volatilização (Souza et al., 2020). Com a aplicação de ureia tratada com NBPT, diversos autores reportam maior recuperação de N pelas plantas e incremento no rendimento de grãos de milho, em função da maior disponibilidade de N no solo ao longo do ciclo da cultura (Liu et al., 2022).

Por exemplo, Souza et al. (2020) verificaram que a ureia recém-tratada com NBPT proporcionou maior produtividade de milho do que a ureia convencional; no estudo deles, a dose de 180 kg ha^{-1} de N em cobertura elevou a produtividade em cerca de $1,2 \text{ t/ha}$ com o uso de ureia + NBPT, comparada à ureia comum na mesma dose. Consequentemente, a eficiência econômica também foi superior com ureia protegida: a margem de lucro por hectare aumentou em todos os níveis de adubação nitrogenada avaliada, mostrando melhor retorno do investimento em fertilizante quando se utiliza ureia com NBPT em vez de ureia não tratada (Souza et al., 2020).

Cabe ressaltar que os benefícios produtivos e econômicos da ureia protegida tornam-se mais evidentes quando não há incorporação imediata do fertilizante por chuva ou irrigação; em experimentos, a ureia revestida por polímeros superou a ureia comum em rendimento de milho quando aplicada superficialmente durante um período de estiagem (veranico), especialmente em doses altas ($>170 \text{ kg N/ha}$), ao passo que, sob chuvas rápidas e suficientes para solubilizar/incorporar o N logo após a aplicação, o desempenho produtivo da ureia revestida foi semelhante ao da ureia convencional (Lam et al., 2018). Isso indica que a vantagem da ureia protegida é maximizada em cenários de maior risco de volatilização, enquanto em condições ideais de manejo (chuva logo após a aplicação ou incorporação mecânica) a ureia comum pode alcançar eficiência próxima, reduzindo a diferença custo-benefício entre as fontes.

Sob o ponto de vista ambiental, a ureia protegida também pode contribuir para mitigar as emissões de óxido nitroso (N_2O). A volatilização de NH_3 proveniente da ureia comum está associada a emissões indiretas de N_2O , pois o NH_3 perdido para a atmosfera pode posteriormente oxidar-se e formar N_2O (Thapa & Chatterjee, 2017). Ao reduzir essas perdas de NH_3 , a ureia tratada com NBPT diminui essa fonte indireta de N_2O .

Além disso, o inibidor NBPT retarda a hidrólise da ureia e a formação de nitrato, o que tende a atenuar os picos de nitrificação e desnitrificação no solo, processos microbiológicos responsáveis pelas emissões diretas de N_2O (Thapa & Chatterjee, 2017; Lam et al., 2018). Alguns trabalhos reportam, de fato, redução nas emissões acumuladas de N_2O com ureia + NBPT em comparação à ureia comum, atribuída à liberação mais gradual do N para o solo (Zhu et al., 2020). Entretanto, os resultados quanto ao N_2O são variáveis: há estudos em que o uso de NBPT sozinho não promoveu

diminuição estatisticamente significativa das emissões de N_2O em relação à ureia convencional (Liu et al., 2022).

Nesses casos, provavelmente o N retido acaba sendo nitrificado e emitido como N_2O mais adiante no ciclo, especialmente se o solo tiver umidade favorável à desnitrificação. Assim, para uma mitigação mais consistente do N_2O , a ureia com inibidor de urease pode ser aliada a práticas complementares (como inibidores de nitrificação do tipo DCD, DMPP, nitrapirina, etc.), que atuam diretamente na etapa de nitrificação e já demonstraram reduzir o N_2O em até ~50–70% (Thapa & Chatterjee, 2017). Em termos de custo-benefício, apesar do preço unitário da ureia protegida ser mais elevado, a redução de perdas de N e o aumento de produtividade tendem a compensar esse investimento. A economia de fertilizante não volatilizado e o ganho de produção resultante equivalem a retorno financeiro para o produtor; por exemplo, Souza et al. (2020) relataram que a ureia tratada com NBPT gerou maior lucro líquido por hectare do que a ureia comum em todas as doses de N testadas, especialmente na dose ótima como 180 kg ha^{-1} , demonstrando ser economicamente vantajoso adotar a ureia protegida nas condições avaliadas (Souza et al., 2020).

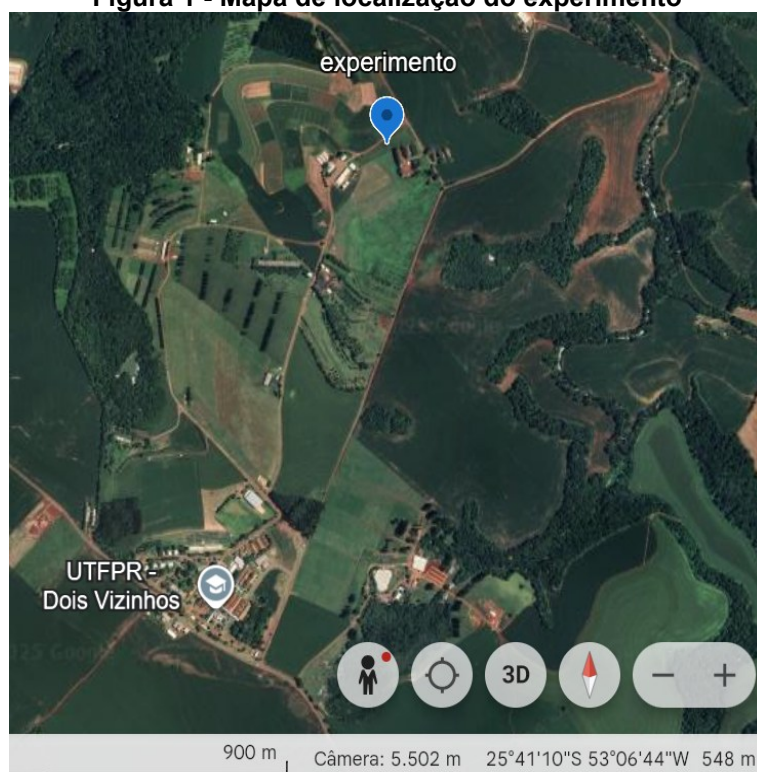
Em escala global, estima-se que as perdas de N por volatilização da ureia representem bilhões de dólares em fertilizante desperdiçado por ano (Liu et al., 2022), recurso que poderia ser parcialmente salvo com fertilizantes de maior eficiência. Portanto, considerando os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos, o uso de ureia protegida (com NBPT ou revestida) mostra-se uma estratégia eficiente para aumentar a disponibilidade de N para a cultura do milho, melhorar a produtividade e o aproveitamento do fertilizante, mitigar emissões de gases indesejáveis e, em muitas situações, elevar o retorno econômico da adubação nitrogenada em comparação à ureia comum convencional.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi implantado em setembro de 2022 na Fazenda Experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná localizada no município de Dois Vizinhos, na região sudoeste do estado do Paraná, a 25° 41' 10" de latitude sul e 53° 06' 44" de longitude oeste, com altitudes variando de 500 a 700 m (GOOGLE EARTH, 2025).

Figura 1 - Mapa de localização do experimento



Fonte: Google Earth (2025)

Segundo a classificação climática de Koppen, a região é caracterizada por um clima subtropical úmido, do tipo Cfa, com precipitação média anual de 2.000 mm (média de 631,22 mm para o período de junho a setembro, dados da Estação Meteorológica do Campus Dois Vizinhos), com chuvas distribuídas uniformemente ao longo do ano, sem estações secas (Alvares et al., 2013). A temperatura média anual é de 16,3°C (média de 18,42°C para o período de junho a setembro de 2023, dados do INMET).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico com textura muito argilosa (Embrapa, 2018). As características físico-químicas da camada do solo, 0- 10 cm e 10 - 20 cm, foram determinadas antes de semeadura, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química do solo (0-10 e 10-20 cm) no início do experimento em setembro de 2022. UTFPR, Campus Dois Vizinhos- PR, 2025

	pH	Índice SMP	P	K	S	MO	V	Ca	Mg	CTC	H+Al	Argila
Camada	CaCl ₂			Mg dm ⁻³		%				cmol dm ⁻³		%
0-10 cm	6,1	6,77	17,0	151,51	11,23	27,13	79,30	7,72	3,10	14,20	2,97	70
10-20 cm	5,8	6,70	6,5	91,88	10,21	22,11	76,96	7,02	2,95	13,32	3,11	70

MO: matéria orgânica; V: saturação por bases.

Fonte: Autora (2025)

3.2 Delineamento experimental e tratamentos avaliados

O ensaio foi realizado em três safras consecutivas, 2022/2023, 2023/2024 e 2024/2025 sendo em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições, totalizando vinte unidades experimentais. Cada unidade experimental foi mantida no mesmo local para as três safras. As parcelas tiveram dimensões de 5 m x 7 m (35 m²). Os tratamentos avaliados foram ureia (45% N) - UR, ureia com inibidor (N-(n-butil) tiofosfóricotriamida - UR+NBPT (45% N), nitrato de amônio (27% N) - NA, nitrato de amônio 70% da dose (27% N) - NA70 e Controle - C, sem o uso de fertilizante nitrogenado, apresentado na Figura 1. Os tratamentos são relativos a fontes de N aplicadas em cobertura na cultura do milho, com dose de 180 kg ha⁻¹ de N, exceto para NA70 com 70% da dose de nitrato de amônio (27%), aplicada 126 kg ha⁻¹ de N.

Figura 2 - Croqui do experimento, nos três anos, com a disposição das parcelas e seus respectivos tratamentos. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2023

Bloco 1	Bloco 2	Intervalo (12m)	Bloco 3	Bloco 4
Parcela 5 Tratamento: ureia	Parcela 6 Tratamento: UAN/NA70%		Parcela 15 Tratamento: Yara Bella	Parcela 16 Tratamento: ureia
Parcela 4 Tratamento: Yara Bella	Parcela 7 Tratamento: ureia + inibidor		Parcela 14 Tratamento: Testemunha	Parcela 17 Tratamento: UAN/NA70%
Parcela 3 Tratamento: ureia + inibidor	Parcela 8 Tratamento: Testemunha		Parcela 13 Tratamento: ureia	Parcela 18 Tratamento: Yara Bella
Parcela 2 Tratamento: UAN/NA70%	Parcela 9 Tratamento: Yara Bella		Parcela 12 Tratamento: ureia + inibidor	Parcela 19 Tratamento: Testemunha
Parcela 1 Tratamento: Testemunha	Parcela 10 Tratamento: ureia		Parcela 11 Tratamento: UAN/NA70%	Parcela 20 Tratamento: ureia + inibidor

Fonte: Autora (2025)

3.3 Manejo da cultura de milho

Na primeira safra, 2022/2023, a semeadura do milho foi realizada no dia de 24

de setembro 2022, de forma mecanizada, sobre uma cobertura de palha de Aveia Preta cv. IAPAR 61, contendo 6,493 t ha⁻¹ de matéria seca, foi utilizado o híbrido AS 1757 PRO 3, com uma população média de 73.000 plantas ha⁻¹, com espaçamento entrelinhas 0,45 m (Figura 4).

Foi realizada uma adubação com o formulado 8.20.25, contendo 32 kg ha⁻¹ de N, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg de K₂O ha⁻¹, aplicado no sulco de semeadura na mesma operação do plantio. Em cobertura foram aplicados os tratamentos na dose 180 kg de ha⁻¹ de N, conforme a fonte, exceto para o tratamento NA70, que recebeu 126 kg ha⁻¹ de N, aos 39 dias após do plantio de milho, quando a cultura estava em V4-V5 (Figura 5). A adubação nitrogenada estabelecida conforme tratamento foi aplicada manualmente nas entrelinhas das unidades experimentais para produtividade. Foram aplicadas em 8 linhas centrais da parcela, sendo pesadas quantidades de fertilizantes correspondentes às doses e fontes para cada linha, buscado maior precisão para aplicação.

Na safra 2023/2024 o plantio foi realizado dia 19 de setembro de 2023, utilizando o mesmo manejo da safra anterior, com aplicação da adubação de cobertura após 34 dias do plantio, e na safra 2024/2025 o plantio ocorreu em 19 de setembro de 2024 e a adubação de cobertura ocorreu após 32 dias após o plantio, o manejo foi o mesmo das primeiras safras, considerando cultura antecessora ser a aveia preta, estágio de aplicação, adubação fosfatada e potássica, híbrido e população de plantas.

Figura 3 - Plantio do milho sobre palhada de aveia preta. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.



Fonte: Autora (2025)

Figura 4 - Aplicação da adubação nitrogenada no milho em estágio V5. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autora (2025)

3.4 Avaliação da volatilização da amônia

Para avaliar as perdas de nitrogênio na forma amoniacal, antes da adubação foram dispostas em cada parcela, dez bases inseridas no solo nas entrelinhas da cultura do milho. Um dia após a aplicação foi instalada em cada parcela uma câmara semiaberta de PVC de 0,195 m de diâmetro e 0,10 m de altura com área de 0,02547 m² da base (Nommik, 1973; Cantarella et al., 2008).

As coletas foram realizadas durante vinte e um dias, e foram iniciadas dois dias após a aplicação das fontes nitrogenadas aconteceram nos respectivos dias 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 15 e 21. No momento da coleta no campo as esponjas que iam sendo retiradas da parte inferior da câmara de coleta eram armazenadas em sacos plásticos e identificados com o número da parcela. As esponjas da parte superior não foram trocadas, porém a cada coleta as mesmas eram umedecidas novamente com uma solução de 90 mL composta por 40 mL de glicerina e 50 mL ácido fosfórico (H₃PO₄) para evitar contaminações externas, a cada coleta as novas esponjas da parte inferior eram embebidas com os 70 mL da solução, colocadas novamente na câmara e passadas para a próxima base consecutivamente até o final da avaliação.

Figura 5 - Aplicação das fontes minerais nas bases (A) e câmaras de PVC utilizadas para as coletas (B). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 - Identificação da esponja após coleta. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2023)

3.5.1 Extração, destilação e titulação da amônia

As esponjas vindas do campo foram mantidas em um congelador com

temperatura de aproximadamente 4 °C até o momento da extração. Para a extração da amônia contida nas esponjas, foi adicionado aos sacos plásticos com as esponjas 410 mL de solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹, fechados os sacos plásticos e deixando-os em repouso por uma hora. Após esse período, as esponjas e a solução foram depositadas em bandejas limpas e pressionadas com as mãos para se extrair o máximo da solução.

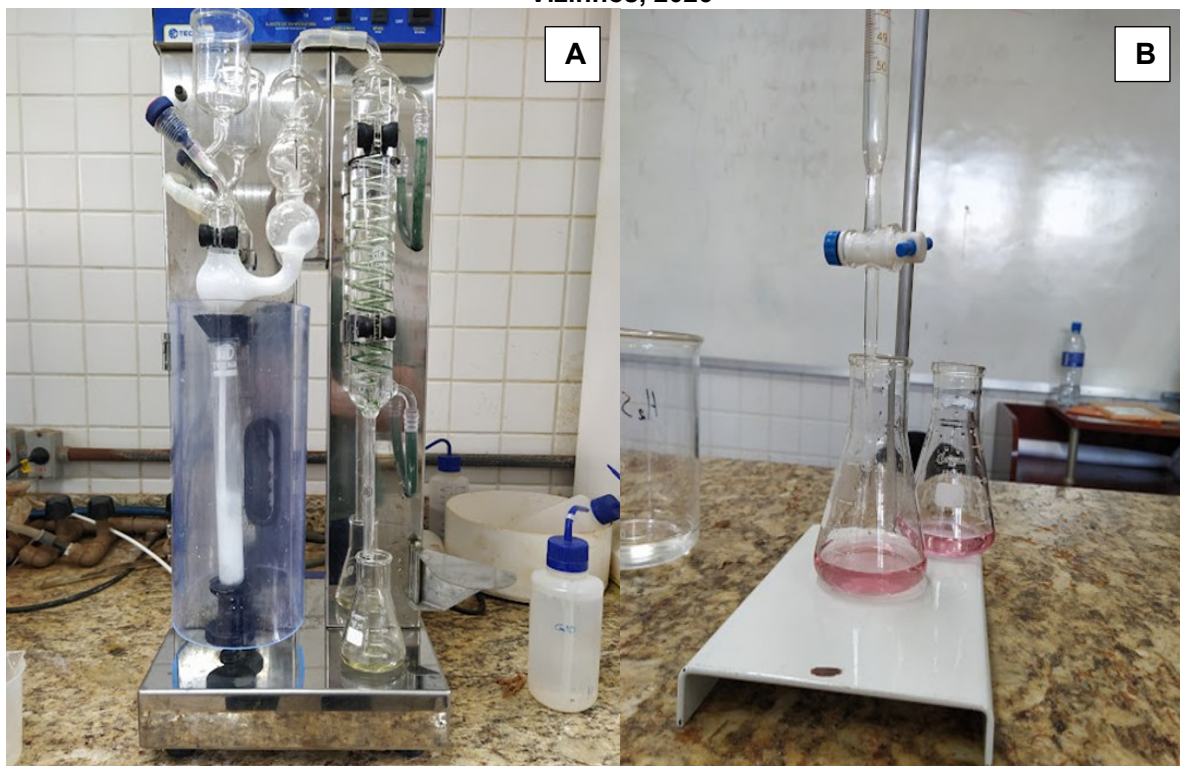
Essa solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, onde o volume do balão foi completado com a solução de KCl 1 mol L⁻¹ para garantir a padronização e em seguida feita a agitação para homogeneização da solução. Dessa solução foi retirado uma alíquota de 50 mL, os mesmos foram depositados em refrigerador para posterior análise.

Após a extração foi realizada destilação e a titulação das amostras, onde do extrato armazenado foi retirado uma alíquota de 20 mL medida em pipeta volumétrica e adicionada ao tubo de destilação, previamente identificado e colocado 0,2 g de óxido de magnésio (MgO) anteriormente calcinado a 700 °C. O tubo de ensaio, juntamente com o MgO, foi colocado no destilador de nitrogênio. Em seguida, para captação do volume destilado foi utilizado um Erlenmeyer com 5 mL de solução indicadora de ácido bórico a 2%, esta solução mudou de cor de roxo para verde claro durante o processo, que finalizou quando o volume de destilado atingiu aproximadamente 30-35 mL.

Para a titulação da amostra, foi utilizada uma solução padronizada de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,0025 M. O ponto de viragem da amostra ocorreu quando a solução de ácido bórico mudou de verde para rosa. O volume gasto em mL de ácido para a titulação foi anotado para posterior cálculo da concentração de amônia.

A quantidade de NH₃ volatilizado foi calculada com base no volume total da solução utilizada para a lavagem da esponja (500 mL). Os resultados foram apresentados como taxas diárias (kg ha⁻¹ d⁻¹), perdas acumuladas de NH₃ (kg ha⁻¹) e percentuais de perdas de NH₃-N em relação à dose de N aplicada (% do N aplicado).

Figura 7 - Processo de destilação da amônia (A) e titulação da solução (B). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2022)

3.6 Avaliações de rendimento de grãos, da biomassa e do teor de N da cultura do milho

Para determinar o rendimento de grãos, uma área de 1,36 m² foi colhida manualmente em 4 linhas de dois metros de comprimento e 0,45 m entre as linhas (4 x 0,45 x 2) por unidade experimental no dia de 28/02/2023 na primeira safra, na segunda safra a colheita foi 30/01/2023 e na safra 24/25 foi em 05/02/25. As amostras de plantas foram transportadas para o laboratório e pesadas. A secagem foi efetuada na estufa a 60 °C durante mais de 48 horas e a debulha foi realizada mecanicamente. O rendimento total foi obtido através da determinação da massa dos grãos, da correção da umidade para 13% e da extrapolação dos dados para kg ha⁻¹.

As amostras de palha e de grãos residuais foram moídas em moinho tipo Wiley e depois enviadas para o laboratório da UFRGS para determinação da concentração total de N e C.

A eficiência do N aplicado de fontes nitrogenadas foi avaliada, conforme a equação 4:

$$\text{Eficiência de N (\%)} = [(N \text{ absorvido pela planta} - N \text{ aplicado}) / (\text{taxa de N aplicado})] \times$$

Em seguida a exportação de N foi calculada a partir da produção de MS no grão e teor de N no grão $\times 100$. Foram feitas duas amostragens uma em R6 para avaliar extração grãos e planta e outra feita na colheita para avaliar a produtividade.

3.7 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises foram realizadas com o auxílio do software R versão 4.2.0 (R Core Team, 2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Volatilização

Na Figura 08, mostra a perda diária e perda acumulada de amônia na safra 2022/2023, todos dados em kg de nitrogênio por hectare, e na Figura 09 apresenta as condições climáticas durante o período de avaliação, conseguimos observar que nesta safra teve dois picos de volatilização um no quarto dia e outro no oitavo. Isto pode ser explicado em virtude das precipitações antes da aplicação, onde o solo estava bem úmido, apresentando um pico de perdas, houve mais algumas chuvas em cima, mas não foi o suficiente para que ocorresse a incorporação dos grânulos com as fontes amidicas fazendo que acontecesse mais um pico de volatilização.

Em virtude de o solo estar umedecido diminui a durabilidade do NBPT, diminuindo sua performance também. Então podemos concluir que houve diferencia estatística entre as fontes amídicas e nítricas, sendo que a ureia perde cerca de 10 kg de N comparando com nitrato.

Essas perdas são atribuídas a hidrólise da ureia pela enzima urease no solo, em que eleva o pH ao redor do grânulo e converte o amônio em amônia. observou-se uma tendência de aumento nas taxas de volatilização de N-NH_3 até o 4º dia após a aplicação. A ureia se destacou pelas maiores taxas, atingindo $1,99 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no 4º dia. Mesmo com o uso do inibidor NBPT, a taxa de volatilização chegou a $0,81 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no 4º dia. O uso da dose de 70% de nitrato de amônio gerou taxas de volatilização bem próximas às do tratamento controle (Figura 08).

As perdas acumuladas de N-NH_3 seguiram o mesmo comportamento observado nas taxas de volatilização, estabilizando-se a partir do 4º dia. Aos 21 dias após a aplicação, os maiores acúmulos de perdas foram observados também com o uso de ureia ($5,28 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$) e ureia com inibidor NBPT ($1,90 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$). Entre as fontes nitrogenadas testadas, o uso da dose de 70% de nitrato de amônio resultou nas menores perdas acumuladas ($0,97 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$), enquanto para o tratamento controle as perdas foram de $0,58 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 08).

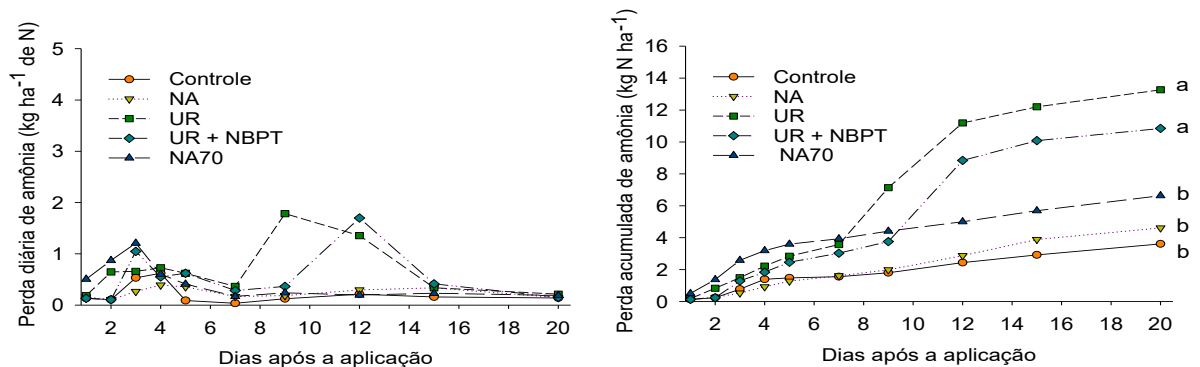
Em termos percentuais, o uso de ureia resultou em perdas acumuladas de 2,61% do N aplicado aos 21 dias após a aplicação. Para a ureia com inibidor NBPT, essa perda foi de 0,74%. Para o nitrato de amônio e nitrato de amônio (70% da dose), as perdas acumuladas foram de 0,22% e 0,24%, respectivamente (Figura 08). A perda

insignificante de N-NH_3 para o uso dessa fonte de N está relacionada à sua reação ácido-neutro no solo, especialmente em solos com pH ácidos (Sarkis et al., 2023).

Viero et al. (2017) observaram que a ureia em sistema de plantio direto no Brasil pode apresentar perdas de até 25% do N aplicado por volatilização, enquanto o uso de inibidores como NBPT reduz significativamente essas perdas.

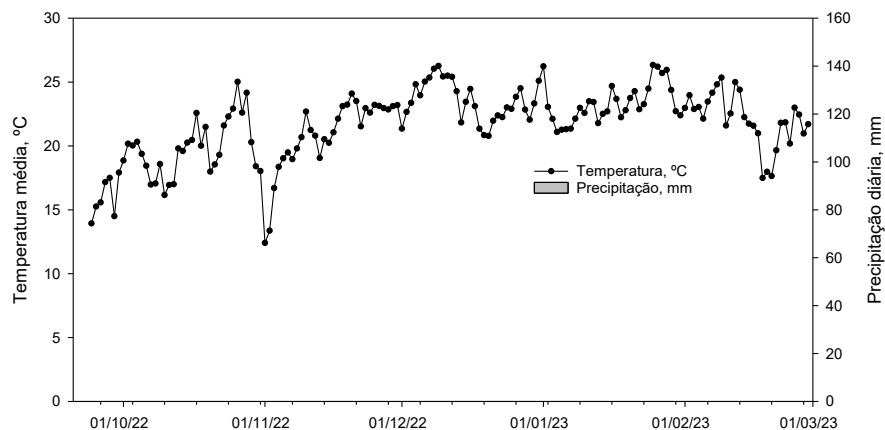
No presente estudo, a ureia associada ao NBPT apresentou menor volatilização em comparação à ureia isolada, porém ainda se mostrou inferior ao nitrato de amônio, confirmando que os inibidores mitigam, mas não eliminam completamente o problema. Souza (2023) menciona um achado semelhante, confirmando as baixas perdas de NH_3 por volatilização, além da ureia que as perdas também foram baixas.

Figura 8- Perda diária de amônia e perda acumulada de amônia na safra 2022/23 de diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2025)

Figura 9- Precipitação e temperatura média da safra 2022/2023, UTFPR Campus Dois Vizinhos.



*Data do plantio de 24/09/2022, total precipitação de 1247 mm. Data de aplicação de N: 02/11/2022.

Fonte: Autor (2025)

Na segunda safra, representada na Figura 10 foi o cenário ideal para a aplicação de fontes amidicas, o solo estava úmido e o alto volume de chuva após a aplicação, garantiu a incorporação do nitrogênio no solo. Sendo assim, houve apenas diferenças estatística da ureia comum em comparação com os demais tratamentos.

Figura 10- Perda diária e acumulada de amônia na safra 2023/24 de fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026

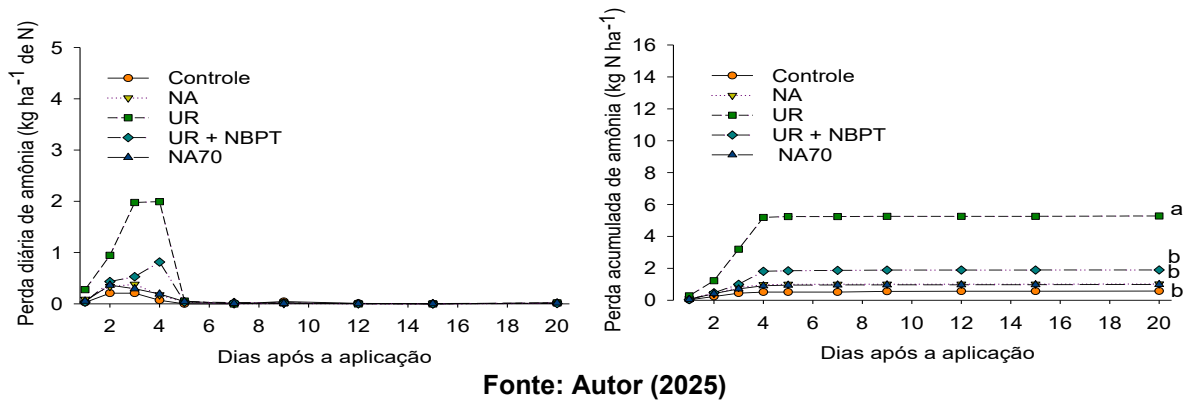
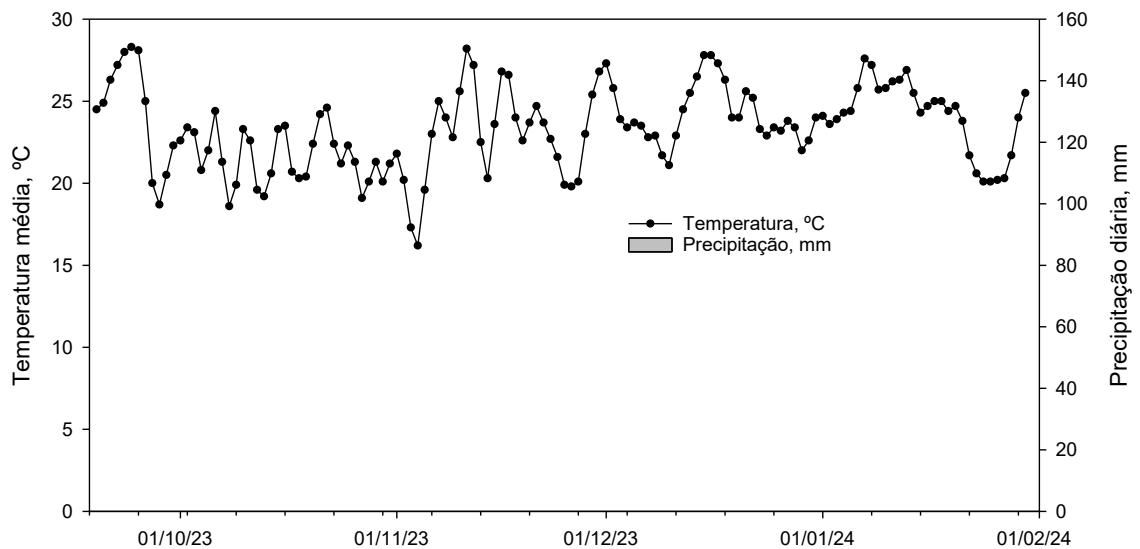


Figura 11- Precipitação e temperatura média, safra 2023/2024, UTFPR Campus Dois Vizinhos.



*Data do plantio de 19/09/2023, total precipitação de 1320 mm. Data de aplicação de N: 23/10/2023.

Fonte: Autor (2025)

Na safra 2024/2025 (Figura 12 e na Figura 13) o solo estava úmido e após a aplicação as precipitações não foram o suficiente para que se ocorresse a

incorporação no nitrogênio ao solo, somado a temperaturas relativamente altas. Neste caso, as fontes amidicas se diferenciaram das fontes nítricas estatisticamente. Assim, também verifica-se que aplicar ureia+NBPT sem condições favoráveis para sua incorporação e temperaturas amenas, será possível a perda de amônia por volatilização de maneira semelhante à ureia comum. A ureia+NBPT é uma tecnologia que busca diminuir os riscos por volatilização, mas não resolve o problema.

As taxas de volatilização apresentaram uma tendência de dois picos: um até o 4º dia após a aplicação e outro entre o 9º e o 15º dia após a aplicação (Figura 1

1). As maiores taxas de volatilização foram observadas com a ureia aos 8 dias após a aplicação ($1,78 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e com a ureia associada ao inibidor NBPT ($1,70 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Essas perdas são atribuídas à hidrólise da ureia pela enzima urease no solo, que eleva o pH ao redor do grânulo e converte o amônio (NH_4^+) em amônia (NH_3), uma forma gasosa e volátil (Cantarella et al., 2018).

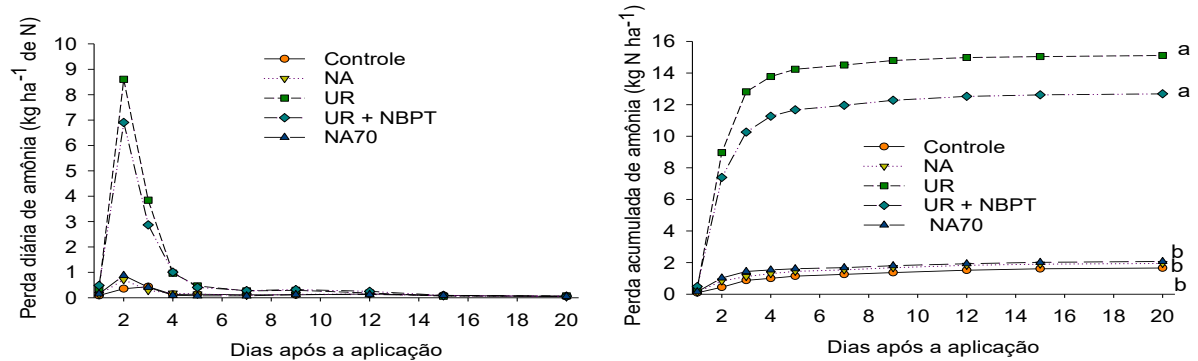
O uso do inibidor de urease NBPT associado à ureia foi eficaz em reduzir as perdas por volatilização, diminuindo-as em cerca de 25% na primeira safra. A eficácia do NBPT em retardar a hidrólise da ureia é bem documentada, permitindo que a ureia se incorpore ao solo pela água da chuva ou irrigação antes que picos de volatilização ocorram (Viero et al., 2017; Cantarella et al., 2018). No entanto, mesmo com o inibidor, as perdas do tratamento Ureia+NBPT foram substancialmente maiores do que as observadas com o nitrato de amônio.

Aos 20 dias após a aplicação, as maiores perdas acumuladas de N-NH_3 também foram observadas com o uso de ureia ($13,27 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$) e ureia com inibidor NBPT ($10,85 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$). Para o nitrato de amônio, as perdas foram de $4,61 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$, enquanto com o uso da dose de 70% de nitrato de amônio as perdas acumuladas foram de $6,63 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$. Para o tratamento controle, as perdas foram de $3,61 \text{ kg N-NH}_3 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 16). Com o uso de ureia, obteve-se perdas acumuladas de 5,37% do N aplicado aos 20 dias após a aplicação. Para a ureia com inibidor NBPT, essa perda foi de 4,02%. Para o nitrato de amônio e nitrato de amônio (70% da dose), as perdas acumuladas foram de 0,56% e 1,68%, respectivamente (Figura 16).

Dados como esses, podem ser justificados pela alta relação entre a volatilização da amônia com o clima e a temperatura. A temperatura exerce papel direto nesse processo, uma vez que é quem acelera a atividade da urease,

intensificando a hidrólise da ureia e antecipando o pico de formação de NH_3 (Sommer; Hutchings, 2001).

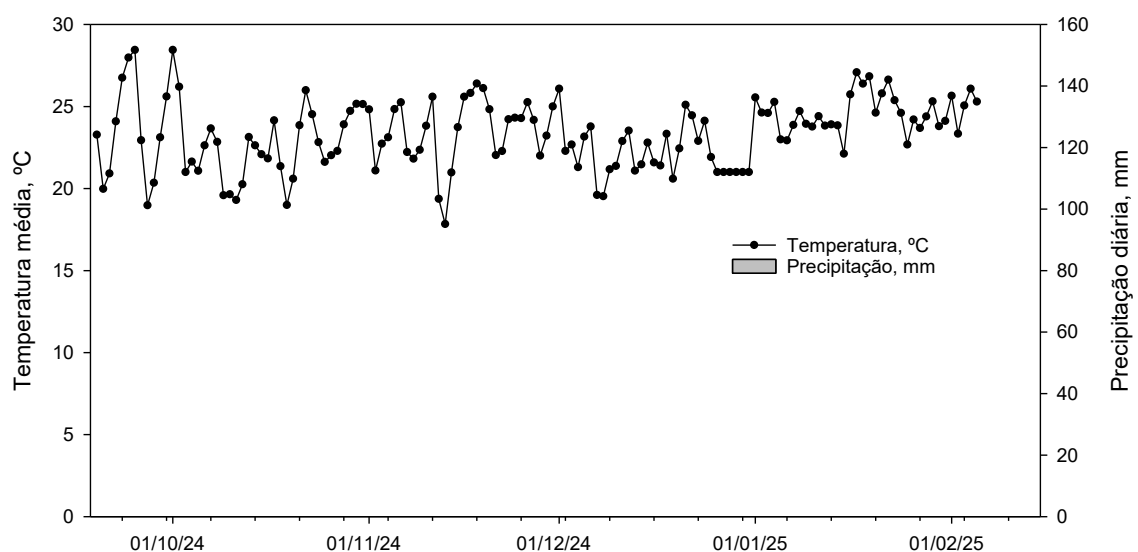
Figura 12 - Perda diária de amônia e perda acumulada de amônia na safra 2024/25 de diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2025)

Cantarella et al. (2018) mencionam que, o clima de maneira integrada, também potencializa os efeitos de volatilização da amônia, por exemplo, alta temperatura e baixa umidade do solo provocam a concentração de NH_4^+ na camada superficial e há menor incorporação do fertilizante ao perfil do solo, elevando os riscos de perdas.

Figura 13- Precipitação e temperatura média do município de Dois Vizinhos, UTFPR, na safra 2024/25



*Data do plantio de 19/09/2024, total precipitação de 721 mm. Data de aplicação de N: 21/10/2024.

Fonte: Autor (2025)

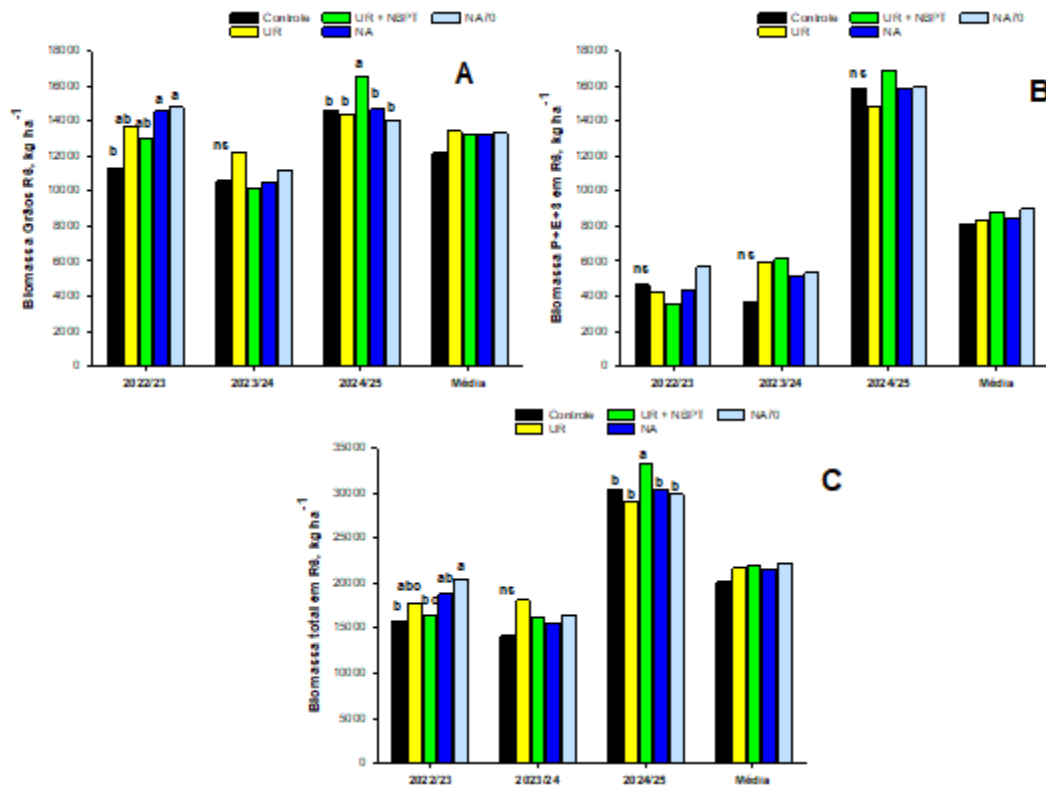
4.2 Biomassa

Nas três safras avaliadas, observou-se diferença significativa entre os tratamentos. Para as variáveis biomassa de grão em R6 (Figura 14A) e biomassa total (Figura 14B), principalmente no primeiro ano de safra (2022/23). Para ambas as variáveis, o tratamento que mostrou maior efeito foi o com NA70, além do tratamento com NA que também se mostrou positivo para a variável biomassa de grãos em R6.

Na safra de 2024/25, para as mesmas variáveis, o tratamento que esboçou melhor efeito foi UR+NBPT, chegando a quase 16.000 Kg ha⁻¹ de biomassa nos grãos e cerca de 32.000 Kg ha⁻¹ de biomassa total.

Para a variável biomassa P+E+S em R6, não foi alcançada significância em nenhuma das safras e em nenhum dos tratamentos (Figura 14C). Em um panorama geral das safras avaliadas, a safra 2023/24, a qual teve maior precipitação (1320 mm) (Figura 11), foi a que esboçou menor quantidade em Kg ha⁻¹ de biomassa, tanto P+E+S, como para a biomassa dos grãos e a total.

Figura 14 - Biomassa dos grãos (A), biomassa Planta-Grãos (B) e biomassa total do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



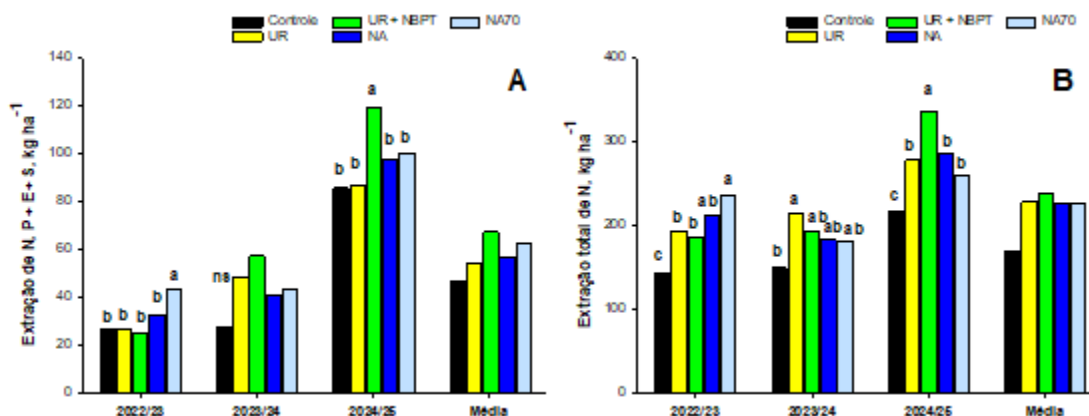
Fonte: Autor (2025)

Isto se explica pelo fato de que, maiores quantidades de chuva, nem sempre significam efeito positivo para a cultura do milho, isto porque alguns mecanismos podem ser barrados, como a luminosidade, interferindo na fotossíntese pela planta e, consequentemente reduzindo o seu crescimento, estresse por água e restrição de crescimento radicular (Li et al., 2019). Além do impacto direto na fase produtiva dos grãos, uma vez que o excesso de chuva no período de enchimento de grãos, atrasa ou reduz a fecundação e, por isso, diminui o potencial de grãos por espiga (Embrapa, 2016). Outro motivo, foi a perda de N pela chuva, já que nos dias após a aplicação de N teve cerca de 300 mm de chuva.

4.3 Extração de N

Para as variáveis, Extração de N, P+E+S e Extração total de N, o tratamento que apresentou melhor resultado foi os submetidos a fonte de UR+NBPT em ambas as variáveis (Figura 15). A extração de N na P+E+S, assim como as variáveis discutidas acima, só apresentou resposta significativa nas safras 2022/23, com o melhor tratamento sendo o NA70 (Figura 15A) e 2024/25 o que esboçou melhor efeito foi a UR+NBPT (Figura 15A), enquanto para a extração total, em todas as safras avaliadas houve diferenças estatísticas. Além disso, nesta segunda variável, embora o melhor tratamento tenha sido a UR+NBPT, na safra 2022/23 o melhor tratamento foi o NA70 e na safra seguinte, foi apenas a UR (Figura 15B).

Figura 15 - Extração de N, P+E+S (A) e Extração total de N do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.



Fonte: Autor (2025)

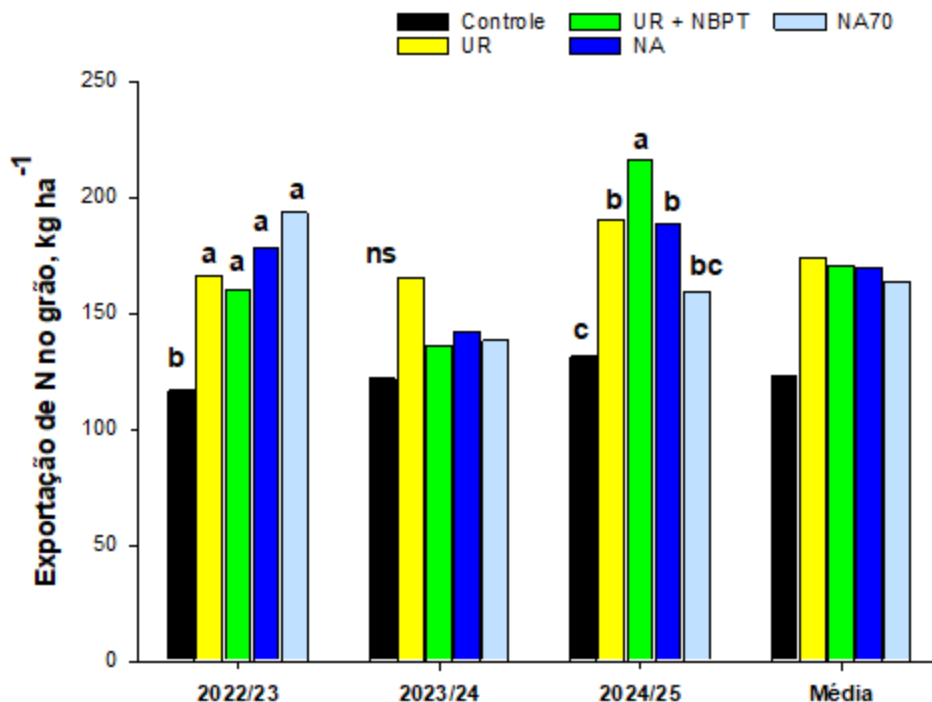
O nitrato de amônio pode promover uma maior eficiência no uso do nitrogênio pelas plantas, favorecendo o acúmulo de matéria seca nos órgãos reprodutivos, como os grãos (Wu et al., 2024). A eficiência do nitrato de amônio pode estar relacionada à sua rápida disponibilidade para as plantas, aliada à liberação gradual do nitrogênio amoniacal, que é assimilado de forma complementar (Fernandes; Campos; Ventura, 2025).

Complementar a isso, Zhang et al. (2020) mencionam que tem sido muito comum que os tratamentos que associam NBPT e ureia esbocem melhores valores, isto porque esse uso auxilia a mitigar as perdas após a aplicação da fonte de nitrogênio no solo, aumentando a probabilidade da sua disponibilidade e, consequentemente, sua extração. Além disso, a adição de NBPT à ureia pode diminuir a atividade da urease no solo após a aplicação de N e reduzir a velocidade de conversão de ureia em amônia, aumentando o efeito de disponibilidade de nitrogênio no solo (Li et al., 2020).

4.4 Exportação de N

A exportação de N nos grãos foi maior quando a planta foi adubada com fontes de NA70% na safra 2022/23 e UR+NBPT na safra 2024/25 (Figura 16). A maior disponibilidade de N no solo melhora a absorção desse nutriente pelas plantas, levando a um aumento da sua concentração e facilitando a exportação do nutriente para os grãos, inclusive nos grãos (Rawal et al., 2024).

Figura 16 -Exportação de N no grão do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a fontes de adubação nitrogenada nas safras 2022/23, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2026



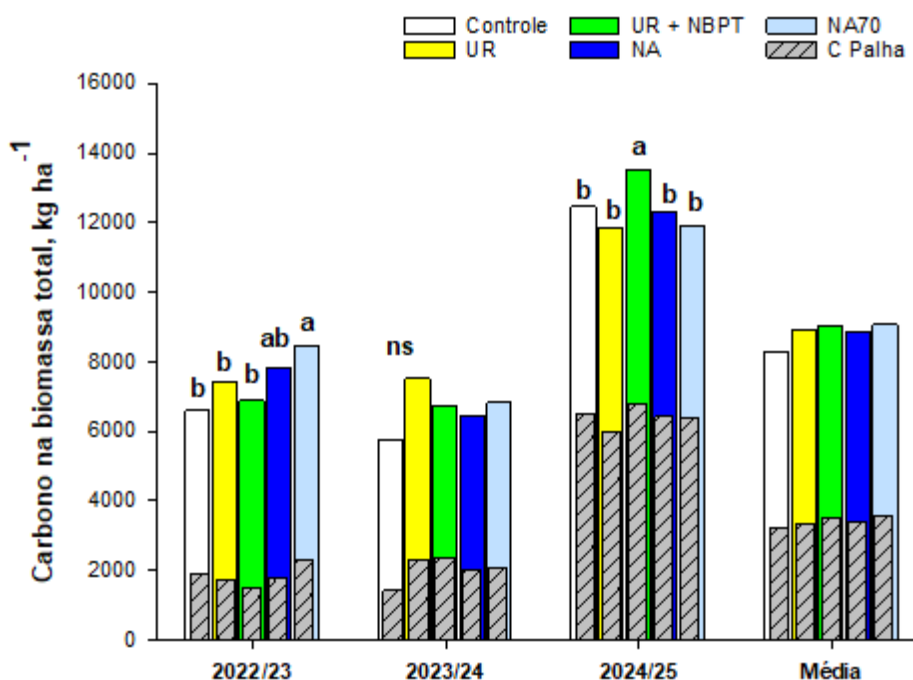
Fonte: Autor (2025)

Silva et al. (2024) mencionam que a exportação de N no grão é consideravelmente maior com adubações com fontes de nitrato de amônio ou a associação da ureia mais o inibidor NBPT, pois as mesmas auxiliam na redução de perdas de N por volatilização e melhora a eficiência de recuperação de N, o que favorece seu transporte interno até os grãos. Isto corrobora, portanto, em um maior acúmulo de nitrogênio nos grãos, ou seja, maior exportação de N. Vale ressaltar que, embora exista a disponibilidade de N e maior concentração, não necessariamente resultará em maior produtividade, isto porque o rendimento agrícola, depende do equilíbrio entre vários fatores fisiológicos, químicos e ambientais (Taiz et al., 2017).

4.5 Carbono

O carbono total na biomassa do milho (Figura 17) esboçou diferenças estatísticas apenas para duas safras (2022/23 e 2024/25), sendo os maiores valores encontrados para os tratamentos com adubações com as fontes NA70 e UR+NBPT.

Figura 17 - Carbono na biomassa total e carbono na palha do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026



Fonte: Autor (2025)

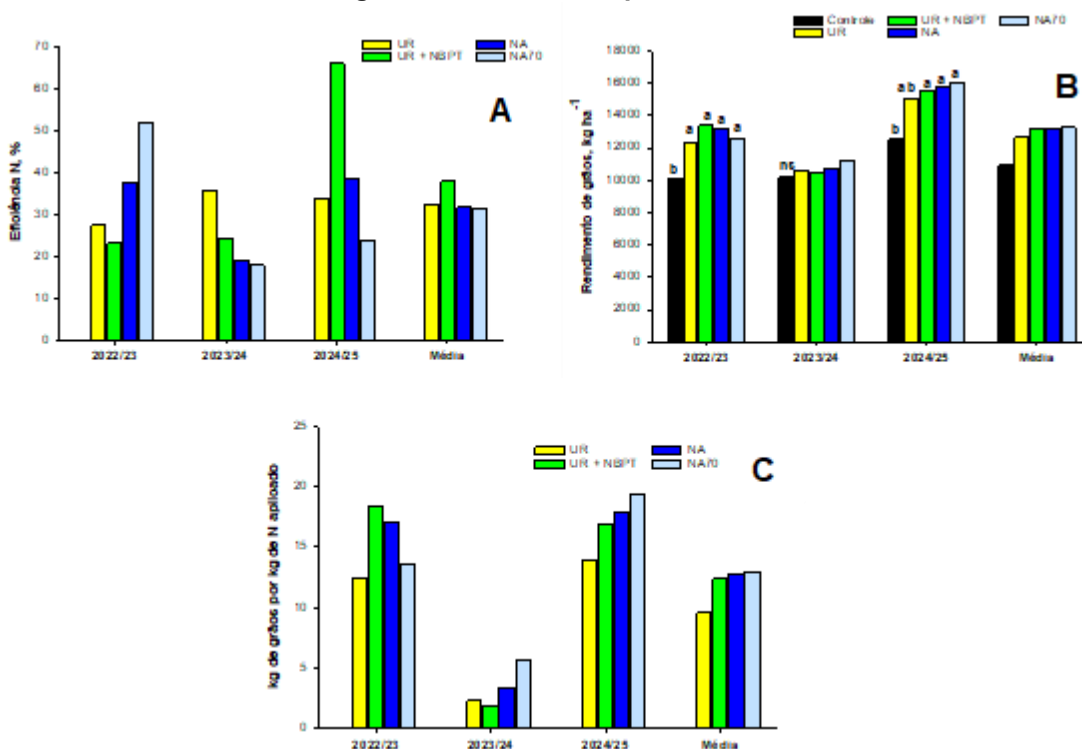
A quantidade de carbono presente nos tecidos vegetais e nos grãos está associado, em grande parte, ao carbono estrutural, representado por compostos como celulose, hemicelulose, lignina e outros constituintes orgânicos relativamente estáveis. Esses componentes estruturais tendem a apresentar menor sensibilidade às variações promovidas pela adubação nitrogenada quando comparados aos compostos nitrogenados ou metabólitos mais lábeis, como proteínas e carboidratos solúveis (Liu et al., 2016). Ainda na Figura 17, pode-se observar que o carbono na palha, aquele que fica para a cobertura do solo é consideravelmente maior na safra 2024/25, ano que produziu mais biomassa e teve chuvas mais bem distribuídas do que em outros anos avaliados. Caracterizando que a adubação nitrogenada e altas produtividades também determinam maior potencial de sequestro de carbono para o sistema, contribuindo para sustentabilidade do sistema de produção.

4.6 Eficiência de N

A adubação nitrogenada aumentou significativamente a produtividade em relação ao tratamento controle na primeira safra (Figura 18), um resultado amplamente consolidado na literatura, que estabelece o nitrogênio como o nutriente

mais limitante para o rendimento do milho (Yue et al., 2021). Embora não tenha sido observada diferenças estatísticas entre as fontes de N, o uso de ureia com inibidor NBPT contribuiu para uma maior produtividade do milho em relação ao uso de nitrato de amônio.

Figura 18 - Eficiência de N (A), rendimento de grãos (B), eficiência do N (Kg de grãos por Kg de N aplicado) (C) do híbrido de milho AS 1757 PRO 3 submetido a diferentes fontes de adubação nitrogenada. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2026.



Fonte: Autor (2025)

Embora na primeira safra avaliada, a maior eficiência de N tenha sido obtida utilizando o nitrato de amônia 70, a maior eficiência entre todos os anos, foi obtida com o uso da UR+NBPT, avaliando todas as safras (Figura 18A). No entanto, em nenhuma das safras, houve diferença significativa para o uso da dose de 100% de nitrato de amônio (NA) e da ureia (UR) com relação a eficiência de N. Este resultado evidencia que a otimização da dose de N pode aumentar a eficiência, gerando benefícios econômicos e ambientais. A aplicação de N em doses mais alinhadas com a demanda da cultura tende a diminuir as perdas e aumentar a proporção do nutriente que é efetivamente convertida em produto colhível (Zhang et al., 2023).

Com relação ao rendimento de grãos, valores significativos estatisticamente foram apresentados nas safras 2022/23 e 2024/25. Os maiores valores, assim como

grande parte das variáveis avaliadas, se concentraram nas adubações com fontes de Ureia+NBPT e 70 de nitrato de amônia (Figura 18B). Este fato pode ser explicado pela redução das perdas por volatilização da ureia, quando comparada a convencional e por retardar a hidrólise da ureia através do NBPT, traduzindo-se em maior crescimento vegetativo, maior área foliar e maior capacidade fotossintética, que são fatores essenciais para altos rendimentos (Cantarella et al., 2018).

Já quando se considera a eficiência do uso do nitrogênio expressa em Kg de grãos por Kg de N aplicado, de modo geral, é possível dizer que fontes nitrogenadas com menor suscetibilidade a perdas apresentaram maior eficiência. Na primeira safra, o tratamento com UR+NBPT apresentou maior eficiência do nitrogênio, seguida do NA, corroborando com o que Trenkel (2010) apontou, que o uso de inibidores de uréase, como o NBPT, reduz significativamente as perdas de N por volatilização de amônia, aumentando a disponibilidade do nutriente no solo e sua absorção pelas plantas.

Comparando as safras, a de 2023/24 foi a que teve uma queda acentuada da eficiência em todos os tratamentos, com destaque para o melhor desempenho relativo do NA70. Essa queda, pode ser explicada pela maior quantidade de chuvas neste período, que entre os anos analisados foi o que teve maior precipitação (1320 mm), podendo ter intensificado perdas por lixiviação e desnitrificação (Snyder; Bruulsema; Jensen, 2009).

Para a safra 2024/25, foi o contrário da safra anterior, uma vez que apresentou um aumento expressivo da eficiência em todas as fontes, principalmente para NA e NA70, superando a UR e a UR+NBPT. A maior eficiência das fontes nítricas nessa safra pode estar associada a melhor sincronização entre a oferta de N e a demanda da cultura, além de condições edafoclimáticas favoráveis a absorção do nitrato, como queda da umidade do solo e temperatura (Raun; Johson, 1999), apresentando maior rendimento de grãos entre as três safras.

5. CONCLUSÕES

A adubação nitrogenada promoveu incrementos significativos na produtividade do milho em relação ao controle.

O nitrato de amônio apresentou as menores perdas da volatilização de amônia.

A ureia tratada com NBPT reduziu parcialmente as perdas em comparação à ureia convencional, porém manteve volatilização superior ao nitrato de amônio.

O uso de fontes nitrogenadas de maior eficiência, aliado à otimização da dose aplicada, constitui estratégia agronomicamente eficiente e ambientalmente sustentável para a cultura do milho em regiões subtropicais.

REFERÊNCIAS

- AITA, C. et al. Efeito de inibidores de nitrificação e urease sobre as emissões de N_2O após aplicação de ureia em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1140–1150, 2015.
- ALLOWAY, B. J. **Zinc in soils and crop nutrition**. 2. ed. Brussels: International Fertilizer Industry Association, 2008.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Boletim estatístico anual de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2022.
- ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Distribuição e importação de fertilizantes no Brasil: Boletim estatístico anual 2022**. São Paulo: ANDA, 2022.
- ars.usda.gov
- BODDEY, R. M. et al. Mitigation of greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture: opportunities and challenges. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 246, p. 34–45, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Atualização da Contribuição Nacionalmente Determinada – NDC Brasil**. Brasília: MMA, 2022.
- BREMNER, J. M. Nitrogen release from fertilisers applied to soil. **Fertilizer Research**, v. 28, p. 1–6, 2007.
- CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, v. 302, p. 1–17, 2008. DOI: 10.1007/s11104-007-9466-3.
- CANCELLIER, E. L. et al. Ammonia volatilization from enhanced-efficiency urea on no-till maize in Brazilian cerrado with improved soil fertility. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 2, p. 133–144, 2016.
- CANCIAN, A.; VIERO, F.; FONTOURA, S. M. V.; SOARES, J. R.; BAYER, C. Ammonia volatilization from NBPT-treated urea in no-till maize at different soil textures in South Brazil. *Geoderma Regional*, v. 40, art. e00946, 2025. DOI: 10.1016/j.geodrs.2025.e00946sciencedirect.com
- CANTARELLA, H. et al. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19–27, 2018.
- CANTARELLA, H. et al. Estratégias para uso eficiente de nitrogênio e mitigação de gases de efeito estufa na agricultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170365, 2018.
- CANTARELLA, H. et al. Manejo da adubação nitrogenada em milho e trigo. **Informações Agrônomicas**, n. 161, p. 1–16, 2018.
- CANTARELLA, H. et al. Strategies for efficient nitrogen use in agriculture and mitigation of greenhouse gas emissions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170365, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbcs20170365.
- CANTARELLA, H. **Importância do manejo adequado de fertilizantes nitrogenados**. Entrevista ao portal GlobalFert. GlobalFert, 07 out. 2016. Disponível em: <https://globalfert.com.br>. Acesso em: 11 nov. 2025.

CARRASCOSA, H. *et al.* Nitrification inhibitors mitigate nitrous oxide emissions in maize cropping systems in South America. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 326, 107763, 2022.

CASSIM, C. M. *et al.* Ureia estabilizada com NBPT em doses crescentes de nitrogênio na cultura do milho em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0210066, 2021.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210066>

CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Research**, v. 149, p. 107–118, 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.05.013.

CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: a review. **Field Crops Research**, v. 133, p. 48–67, 2012. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.05.009.

COELHO, A. M. *et al.* Adubação nitrogenada em milho safrinha em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, e03071, 2023.

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. (Circular Técnica, 96).

COELHO, A. M.; SOUZA, E. R.; ALMEIDA, R. E. M. de. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho em alta produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0220034, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Custos de produção agrícola – milho**. Brasília: Conab, 2024.

DUARTE, J. O. *et al.* Milho: cultivo, mercado e potencial agroindustrial. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 52, n. 1, p. 5–18, 2022.

EMBRAPA. **Milho: manejo do clima e da cultura**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2022.

ERNANI, P. R. *et al.* **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2016.

FAGERIA, N. K. *et al.* Interactions of sulfur with other nutrients in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 2, p. 204–219, 2022. DOI: 10.1080/01904167.2021.1956895.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. Nutrient uptake, use efficiency and biofortification in cereal crops. **Journal of Plant Nutrition**, v. 37, n. 11, p. 1731–1744, 2014.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT – Maize production**. Rome: FAO, 2021.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. World fertilizer trends and outlook to 2022. Rome: FAO, 2021.

FERNANDES, D. B.; CAMPOS, L. V.; VENTURA, M. V. A. Desempenho da aplicação foliar de nitrogênio na cultura do milho: Eficiência e resposta fisiológica. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 6, p. e7714649069, 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Fertilizer use by crop in Brazil**. Roma: FAO, 2023.

FRAZÃO, L. A. et al. Fontes e doses de nitrogênio em cobertura na cultura do milho irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 126–133, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200002>

GALVÃO, A. M.; OLIVEIRA, M. F.; LIMA, R. A. A domesticação do milho: origem e dispersão geográfica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 10, n. 2, p. 65–74, 2015.

GASPARI, A. C. et al. Redução das emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira por meio de boas práticas agrícolas. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. 349–367, 2022.

GLEITH, L. R.; SANTOS, M. E. R.; OLIVEIRA, P. P. A. Eficiência de uso do nitrogênio e sustentabilidade na produção de milho em solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0210123, 2022.

HAEGELE, J. W. et al. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. **Crop Science**, v. 53, n. 4, p. 1256–1268, 2013.

HIJAZI, F. Y. et al. Controlled-release nitrogen fertilizers improve nitrogen recovery and reduce losses in maize cropping systems. **Field Crops Research**, v. 295, 108913, 2023. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108913.

IFA – International Fertilizer Association. *Fertilizer Outlook 2022–2026*. Paris: IFA, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Em abril, IBGE prevê safra de 328,4 milhões de toneladas para 2025. Rio de Janeiro: IBGE, 11 abr. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/43400-em-abril-ibge-preve-safra-de-328-4-milhoes-de-toneladas-para-2025>. Acesso em: 17 jul. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION – IFA. *Fertilizer consumption statistics*. IFASTAT, 2019. Disponível em: <https://www.fertilizer.org>. Acesso em: 11 nov. 2025.

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*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

JALAL, A. et al. Role of sulfur in enhancing nitrogen use efficiency and grain yield in cereals. **Field Crops Research**, v. 293, 108849, 2023. DOI: 10.1016/j.fcr.2023.108849.

KITCHEN, N. R.; SCHARF, P. C.; CLAY, D. E.; ROBERTS, D. F. A synthesis of 30 years of maize nitrogen response research in North America. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 3, p. 737–752, 2020.

KRAEMER, B. M. *et al.* Eficiência agronômica de fontes de N e estabilidade produtiva em milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, e70875, 2022.

LAM, S. K.; SUTER, H.; BAI, M.; WALKER, C.; DAVIES, R.; MOSIER, A. R.; CHEN, D. Using urease and nitrification inhibitors to decrease ammonia and nitrous oxide emissions and improve productivity in a subtropical pasture. *Science of the Total Environment*, v. 644, p. 1531–1535, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.092pubmed.ncbi.nlm.nih.gov.

LI, X. *et al.* Adding NBPT to urea increases N use efficiency of maize and decreases the abundance of N-cycling soil microbes under reduced fertilizer-N rate on the North China Plain. **Journal**, 2020.

LIU, C.; ZHANG, Y.; LIU, H.; LIU, X.; REN, D.; WANG, L.; GUAN, D.; LI, Z.; ZHANG, M. Fertilizer stabilizers reduce nitrous oxide emissions from agricultural soil by targeting microbial nitrogen transformations. *Science of the Total Environment*, v. 806, art. 151225, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151225sciencedirect.com.

LIU, J. *et al.* Nitrogen addition affects chemical compositions of plant tissues, litter and soil organic matter. **Ecology**, v. 97, n. 7, p. 1796–1806, 2016.

LIU, T. *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on nitrous oxide emissions from maize cropping systems: a global meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 333, 107965, 2022. DOI: 10.1016/j.agee.2022.107965.

LU, Y. *et al.* Synergistic effects of potassium and nitrogen fertilization on maize yield and nitrogen use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 5, p. 2483–2494, 2022. DOI: 10.1002/agj2.21155.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. de C.; SANTOS, H. G. dos. Manejo da fertilidade dos solos tropicais para altas produtividades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0220042, 2022.

MAGAR, B. T. *et al.* Genetic variability and trait association in maize (*Zea mays* L.) varieties for growth and yield traits. **Heliyon**, v. 7, n. 9, p. e07939, 2021.

MALISZEWSKI, E. *Conflito mantém incerteza em fertilizantes*. Agrolink, 04 abr. 2022. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br>. Acesso em: 11 nov. 2025.

MAPA – **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. *Plano ABC+ 2020–2030: Estratégia para uma agropecuária sustentável*. Brasília: MAPA, 2021.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v. 115, n. 1, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1002/agj2.21493.

OLIVEIRA, M. N. *et al.* Eficiência agronômica de fontes nitrogenadas com inibidor de urease no milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 5, p. 297–303, 2021.

OLIVEIRA, M. N. *et al.* Emissões de óxido nitroso em função da forma e do manejo de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 9, p. 669–675, 2019.

OLIVEIRA, M. N.; GUIMARÃES, G. P.; MENDES, A. V. Eficiência agronômica da adubação combinada de macro e micronutrientes no milho em solos tropicais.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 27, n. 1, p. 35–42, 2023.

PAN, B. et al. Ammonia volatilization from urea as influenced by stabilized nitrogen fertilizers and environmental conditions. *Agronomy Journal*, v. 108, p. 109–115, 2016. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0217>

PEREIRA, M. G. et al. Efeitos de inibidores de urease e de nitrificação no aproveitamento do nitrogênio por plantas de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 47, e0220010, 2023.

RAMALHO, J. C.; RODRIGUES, A. P.; MARTINS, L. D. Macro e micronutrientes na produtividade do milho: implicações fisiológicas e estratégias de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0220134, 2022.

RATHORE, T. R. et al. Nitrogen fertilizer technologies for climate-smart agriculture: recent advances and future perspectives. **Environmental Pollution**, v. 321, 121000, 2023.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357–363, 1999.

RAVISHANKARA, A. R.; DANIEL, J. S.; PORTMANN, R. W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. **Science**, v. 326, n. 5949, p. 123–125, 2009.

RAWAL, N. et al. Grain yield, nitrogen accumulation, and its use efficiency of maize (*Zea mays* L.) as influenced by varying nitrogen rates. **International Journal of Agronomy**, v. 2024, n. 1, p. e4104123, 2024.

RÖMHELD, V.; KIRKBY, E. A. Research on potassium in agriculture: needs and prospects. **Plant and Soil**, v. 335, n. 1, p. 155–180, 2010. DOI: 10.1007/s11104-010-0520-1.

ROTH, G. W.; ORT, D. R.; BENNETT, J. M. Nitrogen management strategies to improve maize productivity and nutrient use efficiency. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 1255, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12051255.

SAKURADA, E. T. et al. Nitrogen fertilization strategies to maximize maize yield and nitrogen use efficiency in southern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 3, p. 1655–1668, 2022. <https://doi.org/10.1002/agj2.21065>

SANGOI, L.; ALMEIDA, M. L. de. Exigências nutricionais e eficiência de utilização de nutrientes pela cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 587–596, 1994.

SANTOS, F. C. dos et al. Volatilização de amônia em função de fontes e modos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200171, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200171>

SANZONOWICZ, C.; RAIJ, B.; MOREIRA, A. Efficiency of potassium fertilization in tropical soils under intensive cropping systems. **Agronomy**, v. 12, n. 3, p. 540, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12030540.

SARKIS, L. F. et al. Ammonia volatilization from conventional and stabilized fertilizers, agronomic aspects and microbiological attributes in a Brazilian coffee crop system. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. e1291662, 2023.

SILVA, A. C. da; OLIVEIRA, L. G.; FERREIRA, M. S. Dinâmica da produção de milho no Brasil: histórico, avanços e perspectivas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 54, n. 1, p. 1–12, 2023.

SILVA, et al. The Combined Use of Liquid Fertilizer and Urease/Nitrification Inhibitors on Maize Yield, Nitrogen Loss and Utilization in the Mollisol Region. **Plants**, v. 12, n. 7, 2024.

SILVA, J. T. da; SOUZA, A. P.; PEREIRA, L. M. Adaptabilidade do milho às condições brasileiras: solos e clima. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 17, n. 2, p. 80–89, 2023.

SILVA, M. F.; OLIVEIRA, L. C.; PIRES, C. F. Adubação nitrogenada e emissões de óxidos de nitrogênio em sistemas de produção de milho no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 52, n. 4, p. 654–663, 2021.

SILVA, M. F.; OLIVEIRA, L. C.; PIRES, C. F. Adubação nitrogenada e emissões de óxidos de nitrogênio em sistemas de produção de milho no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, n. 4, p. 654–663, 2021. Qualis A2.

SNYDER, C. S.; BRUULSEMA, T. W.; JENSEN, T. L. Greenhouse gas emissions from cropping systems and the influence of fertilizer management. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 133, n. 3–4, p. 247–266, 2009.

SOMMER, S. G.; HUTCHINGS, N. J. Ammonia emission from field applied manure and its reduction — invited paper. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 1–15, 2001.

SOUZA, A. C.; SOUSA NETO, J. A.; REZENDE, C. F. A. Adubação nitrogenada no milho com diferentes fontes de nitrogênio. **Científica-Multidisciplinary Journal**, v. 10, n. 2, p. 1-8, 2023.

SOUZA, E. F. C.; SORATTO, R. P.; SANDAÑA, P.; VENTEREA, R. T.; ROSEN, C. J. Split application of stabilized ammonium nitrate improves potato yield and nitrogen-use efficiency with reduced application rate in tropical sandy soils. **Field Crops Research**, v. 254, art. 107847, 2020. DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107847

SOUZA, G. S. et al. Eficiência agrônômica e econômica de fontes de nitrogênio em milho safrinha. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 4, p. 111–118, 2020. <https://doi.org/10.32404/rean.v7i4.4090>

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Anuário estatístico 2022**. São Paulo: ANDA, 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

THAPA, R.; CHATTERJEE, A. Wheat production, nitrogen transformation and nitrogen losses as affected by nitrification and double inhibitors. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 5, p. 1825–1835, 2017. DOI: 10.2134/agronj2016.07.0415

tnstate.edu.

TRENKEL, M. E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. 2. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010.

TRENKEL, M. E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture.** Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

VIERO, F. *et al.* Urease inhibitor and irrigation management to mitigate ammonia volatilization from urea in no-till corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160567, 2017.

VILLAS BÔAS, R. L.; MONTEZUMA, M. C. Fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. *et al.* (org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 19, p. 845–928.

WEI, Y. *et al.* Zinc fertilization enhances nitrate assimilation and grain quality in maize under nitrogen limitation. **Plant and Soil**, v. 463, p. 235–248, 2021.

WORLD BANK. **Commodity markets outlook.** Washington: World Bank, abr. 2022. Disponível em: <https://www.worldbank.org>. Acesso em: 11 nov. 2025.

WU, B. *et al.* Post-anthesis dry matter and nitrogen accumulation, partitioning, and translocation in maize under different nitrate–ammonium ratios in Northwestern China. **Frontiers in Plant Science**, v. 15, p. e1257882, 2024.

YUE, K. *et al.* Nitrogen supply affects grain yield by regulating antioxidant enzyme activity and photosynthetic capacity of maize plant in the loess plateau. **Agronomy**, v. 11, n. 6, p. e1094, 2021.

ZHANG, L. *et al.* Optimizing agronomic, environmental, health and economic performances in summer maize production through fertilizer nitrogen management strategies. **Plants**, v. 12, n. 7, p. e1490, 2023.

ZHU, S.; LIU, L.; XU, Y.; YANG, Y.; SHI, R. Application of controlled release urea improved grain yield and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. **PLOS ONE**, v. 15, n. 10, e0241481, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0241481journals.plos.org

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 9, p. 656–669, 2014. DOI: 10.1016/j.jplph.2013.08.008.