

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA**

THAIS REGINA CAVAZZINI

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FONTES DE NITROGÊNIO NA CULTURA
DO TRIGO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DOIS VIZINHOS

2024

THAIS REGINA CAVAZZINI

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FONTES DE NITROGÊNIO NA CULTURA
DO TRIGO**

AMMONIA VOLATILIZATION FROM NITROGEN SOURCES IN WHEAT CROP

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Laércio Ricardo Sartor

DOIS VIZINHOS

2024



[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.

THAIS REGINA CAVAZZINI

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FONTES DE NITROGÊNIO NA CULTURA
DO TRIGO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel em
Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 12/novembro/2024

Laércio Ricardo Sartor
Doutor em Agronomia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Caroline Amadori
Engenheira Agrônoma, Doutora em Ciência do Solo
Pós-doutoranda
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Fernando Adami
Doutor em Fitotecnia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

DOIS VIZINHOS

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, saúde e discernimento e por tornar essa caminhada possível sempre me dando forças para continuar.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Laércio Ricardo Sartor por me guiar e me orientar ao longo dessa trajetória, repassando grandes conhecimentos e ensinamentos.

Aos meus pais, Francisco Cavazzini e Janete Boldori Cavazzini que sempre me motivaram e são a base de tudo, juntamente de minhas irmãs.

As pessoas que são importantes em minha vida, que as tornam mais bela.

Aos demais familiares que de uma forma ou outra fizeram parte dessa trajetória.

Aos colegas e amigos.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

No geral, os solos agricultáveis são pobres nutricionalmente quando se trata de nitrogênio (N). Entretanto, este nutriente é indispensável ao metabolismo das plantas, especialmente para gramíneas. Em busca de melhores e maiores condições de produção a demanda por fertilizantes nitrogenados no Brasil é de grande relevância. Em condições adversas de clima, temperatura e pH a amônia (NH₃) presente nos fertilizantes nitrogenados pode sofrer o processo de volatilização, o que reduz a eficiência da fertilização e ainda emite gases que contribuem ao efeito estufa (GEE). Com objetivo de avaliar a perda de amônia por volatilização de fontes nitrogenadas convencionais e com tecnologia empregada, em busca de fontes mais sustentáveis, conduziu-se um ensaio no campo experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, município de Dois Vizinhos, PR no período de 28 de julho a 16 de agosto de 2023, totalizando 20 dias de ensaio, sob a cultura do trigo. As fontes avaliadas foram: ureia (UR) (45 % de N), ureia com inibidor de urease (UR+NBPT), nitrato de amônio (NA) (27% de N), nitrato de amônio 70% da dose (NA 70%) e a testemunha (T) sem nitrogênio, em delineamentos de blocos ao acaso com quatro repetições. A dose de N em cobertura foi de 75 kg ha⁻¹, aplicados no perfilhamento da cultura. Para a coleta da NH₃ volatilizada, em cada parcela instalou-se 10 bases de policloreto de vinila (PVC), dispostas na entrelinha da cultura, em cada base foram aplicados os fertilizantes e, posteriormente, as bases serviram de sustentação para as câmeras de captura da NH₃ volatilizada. Como resultados, foram observadas maiores perdas de nitrogênio, via amônia volatilizada (N-NH₃) quando utilizado o fertilizante UR, seguido de UR+NBPT, representando uma perda acumulada ao final dos 20 dias de 6,92 e 5,12 kg ha⁻¹ do N aplicado, respectivamente. O NA foi o fertilizante com as perdas mais estáveis durante as avaliações, onde NA acumulou uma perda de 0,96 kg ha⁻¹ e NA 70% 0,14 kg ha⁻¹. Dessa forma, concluiu-se que, em relação a UR, a UR + NBPT foi capaz de retardar o pico de volatilização da NH₃, registrados respectivamente no 3° e 6° dia após aplicação dos fertilizantes (DAA), porém, estatisticamente não apresentaram diferenças em relação a perda acumulada de N-NH₃ ao final dos 20 dias. Menores perdas foram registradas quando utilizado o NA.

Palavras-chave: Fertilizantes nitrogenados; perdas de amônia; ureia; inibidor de urease; nitrato de amônio.

ABSTRACT

In general, arable soils are nutritionally poor when it comes to nitrogen (N). However, this nutrient is essential for plant metabolism, especially for grasses. In the pursuit of better and higher production conditions, the demand for nitrogen fertilizers in Brazil is of great importance. Under adverse conditions of climate, temperature, and pH, ammonia (NH₃) present in nitrogen fertilizers can undergo the volatilization process, which reduces fertilization efficiency and also releases gases that contribute to the greenhouse effect (GEE). The aim was to evaluate ammonia loss through volatilization from conventional nitrogen sources and those with applied technology, in search of more sustainable alternatives. A field trial was conducted at the experimental farm of the Federal Technological University of Paraná, in the municipality of Dois Vizinhos, PR, from July 28 to August 16, 2023, totaling 20 days of the trial, under wheat cultivation. The evaluated sources were: urea (UR) (45% N), urea with urease inhibitor (UR+NBPT), ammonium nitrate (NA) (27% N), ammonium nitrate at 70% of the dose (NA 70%), and the control (T) without nitrogen, in a randomized block design with four replications. The nitrogen dose applied in coverage was 75 kg ha⁻¹, applied at the tillering stage of the crop. To collect volatilized NH₃, 10 polyvinyl chloride (PVC) bases were installed in each plot, arranged in the crop interrows. Fertilizers were applied to each base, which then served as support for the chambers capturing the volatilized NH₃. As a result, higher nitrogen losses via volatilized ammonia (N-NH₃) were observed when using the UR fertilizer, followed by UR+NBPT, representing a cumulative loss at the end of the 20 days of 6.92 and 5.12 kg ha⁻¹ of the applied N, respectively. The NA was the fertilizer with the most stable losses during the evaluations, with NA accumulating a loss of 0.96 kg ha⁻¹ and NA 70% accumulating 0.14 kg ha⁻¹. Thus, it was concluded that, compared to UR, the UR + NBPT was able to delay the peak of NH₃ volatilization, which was recorded on the 3rd and 6th days after fertilizer application (DAA), respectively. However, statistically, there were no differences in the cumulative loss of N-NH₃ at the end of the 20 days. Lower losses were recorded when using NA.

Keywords: Nitrogen fertilizers; ammonia losses; urea; urease inhibitor; ammonium nitrate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rota de produção de fertilizantes nitrogenados – amônia como matéria prima	18
Figura 2 – Análise do solo nas camadas de 0 - 10 cm.	22
Figura 3 – Croqui da área experimental conduzida em delineamento de blocos casualizados em função das fontes de nitrogênio.	23
Fotografia 1 - Coletores semiabertos de PCV para instalação das esponjas de captura de NH₃ volatilizada.	25
Fotografia 2 - Procedimento de troca de câmaras entre as bases para captura da amônia volatilizada.	26
Gráfico 1 – Dados de precipitação e temperatura no período de coletas de N-NH₃ – Dois Vizinhos PR.	28
Gráfico 2 - Perda acumulada de NH₃ dos fertilizantes (a) e perda acumulada de NH₃ em relação ao N aplicado expressa em porcentagem (%) (b).	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa diária de volatilização de NH₃ dos fertilizantes (testemunha:T; ureia:UR; ureia + NBPT: UR + NBPT; nitrato de amônio: NA e nitrato de amônio 70 % da dose: NA 70 %). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2023.....	29
Tabela 2 – Perdas (kg ha⁻¹ dia⁻¹) de amônia volatilizada por coleta dos fertilizantes (testemunha:T; ureia:UR; ureia + NBPT: UR + NBPT; nitrato de amônio: NA e nitrato de amônio 70 % da dose: NA 70 %). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2023.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NA	Nitrato de amônio
NA (70 %)	Nitrato de amônio 70 % da dose
T	Testemunha
UR	Ureia
UR+NBPT	Ureia com inibidor (N-(n-butil) tiofosfóricotriamida
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
DAA	Dias após aplicação
PVC	Policloreto de vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido nitroso
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
KCl	Cloreto de potássio
MgO	Óxido de magnésio
N	Nitrogênio
N ₂	Gás nitrogênio
NBPT	(N-(n-butil) tiofosfóricotriamida
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônio
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
N-NH ₃	Nitrogênio na forma amoniacal
(NH ₄) ₂ CO ₃	Carbonato de amônio
OH ⁻	Hidroxila
H ₂ O	Água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	Demanda de fertilizantes nitrogenados	17
3.2	Produção de fertilizantes nitrogenados	17
3.3	Ciclo do nitrogênio.....	18
3.4	Ureia e ureia com inibidor de urease	19
3.5	Nitrato de amônio	21
3.6	Demanda de nitrogênio na cultura do trigo	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	Localização e clima	22
4.2	Tratamentos e Delineamento experimental	23
4.3	Manejo da cultura de trigo	24
4.4	Avaliação da volatilização de amônia	24
4.4.1	Instalação das bases e câmaras para a captura da amônia	24
4.4.2	Coleta das amostras a campo	25
4.5	Extração da amônia.....	26
4.6	Destilação e Titulação das amostras	27
4.7	Precipitação e temperatura.....	27
4.8	Análise estatística dos dados	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
5.1	Precipitação e temperatura.....	28
5.2	Taxa de volatilização diária	28
5.3	Perdas de amônia por coleta	31
5.4	Perda total acumulada dos fertilizantes	32
6	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

No geral, os solos agricultáveis são pobres nutricionalmente quando se trata de nitrogênio. Entretanto, este nutriente é fundamental ao metabolismo das plantas, além de fazer parte de aminoácidos, ácidos nucleicos e clorofila, o que o torna o nutriente mais requerido pelas plantas, especialmente as gramíneas. Com isso, sua presença é necessária para que ocorra reações bioquímicas nas plantas, e como consequência um maior rendimento na produção agrícola (CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

Visto isso, a demanda por fertilizantes, principalmente, adubos nitrogenados no Brasil tem se intensificado, com o intuito de melhorar as condições de produção bem como o crescimento do setor em busca de maiores produtividades, contribuindo significativamente no que se refere a segurança alimentar, pois possibilita atender à crescente demanda de alimentos no mundo (FAO, 2012).

Existem várias maneiras de fornecer fertilizantes químicos nitrogenados em um sistema agrícola, incluindo a utilização de ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio, entre outros. Porém, quando se trata destes fertilizantes, tem-se uma problemática envolvida em relação a produção e ao seu uso de forma inadequada. Para a produção destes fertilizantes tem-se o envolvimento de alguns processos industriais os quais envolvem grandes gastos energéticos e geram emissões de CO₂. Além disso, a base para sua produção é a amônia (NH₃) e está sob condições adversar de clima, temperatura e pH de solo pode sofrer o processo chamado de volatilização (COSTA *et al*, 2004).

Estes processos são responsáveis pela emissão de alguns gases contribuintes ao efeito estufa (GEE). Embora os gases de efeito estufa ocorram naturalmente na atmosfera e sejam responsáveis pela manutenção do equilíbrio da temperatura, seu efeito pode ser potencializado e tornar-se prejudicial ao planeta através da ação humana, também chamada de intervenção antrópica, provocando uma maior absorção de calor e elevadas temperaturas (RODRIGUES *et al*, 2017).

Dentre as atividades que contribuem com o efeito estufa, as de maior relevância estão relacionadas ao setor industrial e ao uso agrícola dos solos, emitindo principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) (SILVA; MAIA, 2022).

Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022), estas emissões causadas pelo setor englobam diferentes atividades como, digestão de ruminantes e manejo de seus dejetos, queima de resíduos agrícolas, cultivo de arroz, solos manejados e a utilização de adubação nitrogenada. O setor da adubação nitrogenada, contribuiu com 0,9 %

das emissões de CO₂ no ano de 2020, 13,5 % a mais comparado com o ano de 2016, já o setor de solos manejados contribuiu com 31 % das emissões, neste setor ocorre a emissão de N₂O de forma direta devido a mineralização do nitrogênio e de forma indireta devido a sua volatilização.

O N₂O ocupa a terceira posição em relação aos gases de maior abundância na atmosfera e, apesar de ser emitido em menores quantidades que os demais, seu poder de reter calor é cerca de 300 vezes maior que o CO₂ (BORTOLI *et al*, 2012).

Na busca pela mitigação desses processos e por uma agricultura mais sustentável, tem-se a opção de fontes nitrogenadas mais eficientes, ou seja, que volatilizem menos nitrogênio na forma amoniacal (N-NH₃). Ao fazermos o uso dessas fontes, além de aumentarmos a produtividade dos sistemas, também contribuimos com um menor custo ambiental na sua produção, possibilitando assim, uma redução na emissão de gases pela indústria.

Ehlers (1999) define agricultura sustentável como um conjunto de fatores e utilização de técnicas que visam a conservação dos recursos renováveis como solo e água sem causar a perda de biodiversidade e sem usos indiscriminados de fertilizantes e químicos. Diante desse cenário, é importante que o setor agropecuário trabalhe em conjunto ao meio ambiente, em busca de uma agricultura sustentável.

Dentre as diversas opções de fertilizantes nitrogenados a ureia comum é a fonte mais utilizada devido sua alta concentração de nitrogênio em sua formulação, correspondendo a 46 % e, ao seu menor custo por unidade. Embora isso, esta é a fonte que apresenta a maior taxa de volatilização, com perdas que podem atingir até 50 % do total de nitrogênio aplicado, pois a mesma não possui nenhuma tecnologia empregada em sua formulação e ao entrar em contato com o solo reage rapidamente com a enzima urease (TIVELIN *et al*, 2002; CANTARELLA *et al*, 2003).

Em busca de um melhor aproveitamento desta fonte e, visando a redução das perdas de nitrogênio na forma amoniacal tem-se buscado alternativas através da tecnologia, como a adição de NBPT (N-(n-butil) tiofosfóricotriamida) em sua formulação, sendo esta substância, responsável pela inibição da enzima urease (TASCA *et al*, 2011).

Segundo trabalho de SANZ-COBENA *et al* (2008), o NBPT mostrou uma redução na atividade da enzima urease, permitindo uma disponibilidade de nitrogênio de forma gradual no sistema, reduzindo assim, perdas por volatilização.

O fertilizante nitrato de amônio, por sua vez, tem uma baixa procura no mercado, por conta do maior preço por unidade de nitrogênio, porém, sua importância na agricultura está atrelada principalmente a sua formulação, onde sua composição está 50% na forma amoniacal

e 50% na forma nítrica, o que reduz as perdas por volatilização uma vez que o nitrato é diretamente absorvido pelas plantas (FRANCO; NETO, 2007).

Pensando em reduzir os custos por unidade de nitrogênio do fertilizante nitrato de amônio, nesse estudo o mesmo foi testado em sua dose recomendada e também uma dose reduzida, sendo está em 70 %. Nesse sentido, busca-se entender se essa redução é eficiente, uma vez que este fertilizante se perde pouco no sistema e sua procura, no geral, é baixa.

Dessa maneira, alguns cuidados, como a escolha do fertilizante, aplicações nas doses corretas e o uso de fertilizantes com tecnologia empregada, aplicados na época demandada pela cultura são fatores que aumentam a eficiência dos fertilizantes, contribuindo na redução das perdas de N no sistema solo-planta-atmosfera.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a perda de nitrogênio por volatilização de amônia de ureia, ureia + NBPT, nitrato de amônio e nitrato de amônio com 70 % da dose na cultura do trigo em clima subtropical.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar qual dos fertilizantes nitrogenados é o que apresenta as menores perdas de nitrogênio na forma amoniacal.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Demanda de fertilizantes nitrogenados

Fertilizantes são considerados substâncias que em sua formulação possuem um ou mais nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas. Conforme a cultura, seja ela gramínea ou leguminosa, as quantidades requeridas são alteradas, bem como o nutriente. Quando cultivamos plantas anuais estes fertilizantes devem ser disponibilizados conjuntamente para suprir a demanda da planta bem como potencializar sua produção (ZONTA; STAFANATO; PEREIRA, 2021).

Segundo Costa e Silva (2012), o uso de fertilizantes químicos é um dos principais fatores que influenciam a produtividade da agricultura no Brasil e no mundo. Isso se deve ao fato de que os fertilizantes fornecem os nutrientes necessários para que as plantas cresçam e se desenvolvam de maneira saudável, tendo maior produção e qualidade.

Dessa forma, a demanda por fertilizantes no Brasil tem sido fortemente impulsionada, os agricultores têm buscado cada vez mais tecnologias e insumos, avançando e melhorando no que diz respeito a sua produção na busca pelo abastecimento de alimentos e tal intensificação possibilita uma maior produtividade por área, a qual está atrelada a um maior uso de insumos e fertilizantes (PIRES *et al*, 2015).

Segundo Plano Nacional de Fertilizantes, atualmente o Brasil é o quarto maior consumidor global de fertilizantes, respondendo por cerca de 8% do volume (BRASIL, 2023) e de acordo com previsões, para o ano de 2030, espera-se um aumento de aproximadamente 69 milhões de toneladas no uso de fertilizantes, sendo que 67% desse volume é composto por fertilizantes à base de nitrogênio (PIRES *et al*, 2015; TENKORANG; DEBOER, 2008).

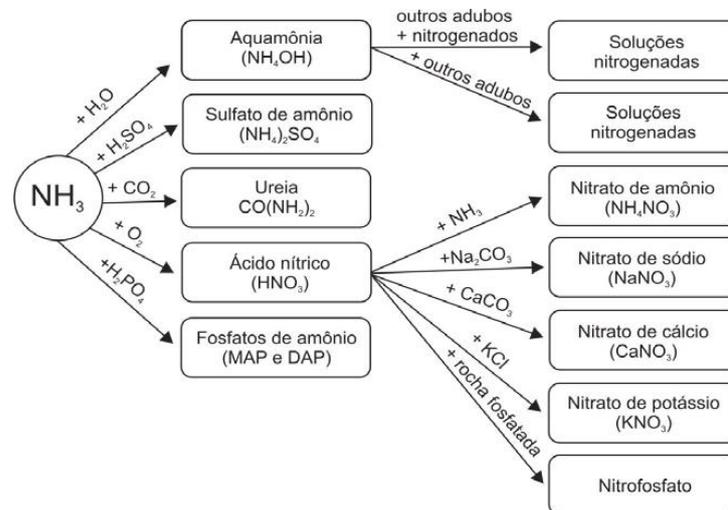
Em 2020, mais de 80% dos fertilizantes consumidos no país foram importados, enquanto a produção nacional atendeu menos de 20% da demanda total. Esta situação é preocupante, especialmente considerando-se que o Brasil deverá ser responsável por quase metade da produção mundial de alimentos até 2050 (EVANGELISTA, 2021).

3.2 Produção de fertilizantes nitrogenados

A produção de fertilizantes depende principalmente da disponibilidade de matéria prima básica. No Brasil, há grandes reservas de matérias primas fundamentais para a produção de fertilizantes, como gás natural, petróleo, rochas fosfáticas e potássicas (EVANGELISTA, 2021).

Fertilizantes nitrogenados são produzidos a partir da amônia (NH_3), matéria prima básica. A amônia é um gás obtido pela mistura de nitrogênio do ar e de hidrogênio proveniente de diversas fontes. O gás natural é a fonte mais comum e mais adequada de hidrogênio para a produção de fertilizantes nitrogenados. Dentre os principais fertilizantes produzidos a base de amônia, temos a ureia que é produzida a partir da reação da amônia com o dióxido de carbono, o nitrato de amônio produzido pela reação da amônia com o ácido nítrico, sulfato de amônio obtido pela reação da amônia com o ácido sulfúrico e o fosfato de monoamônio (MAP) e fosfato de diamônio (DAP) produzidos pela reação de neutralização do ácido fosfórico com amônia (DIAS; FERNANDES, 2006).

Figura 1 – Rota de produção de fertilizantes nitrogenados – amônia como matéria prima



FONTE: Malavolta e Moraes (2009).

3.3 Ciclo do nitrogênio

O nitrogênio (N) é um nutriente crucial para todos os organismos vivos e, muitas vezes, é o fator limitante na produção primária de ecossistemas aquáticos e terrestres. Sendo componente essencial de proteínas, ácidos nucleicos e outros constituintes celulares (VIEIRA, 2017).

A atmosfera contém uma grande quantidade de gases e, o gás nitrogênio (N_2) é o mais abundante, representando cerca de 78% da composição (BAIRD; CANN, 2002). No ambiente, o nitrogênio apresenta uma dinâmica significativa, sofrendo alterações recorrentes em sua forma e estrutura, o que pode resultar em perdas para a atmosfera ou para o solo através da lixiviação. A maior parte das perdas ocorre na forma gasosa, incluindo compostos como N_2O e, principalmente, NH_3 que se dá por meio do processo de volatilização (DOMINGHETTI, 2016).

Para ser aproveitado pelos seres vivos, como as plantas, o nitrogênio precisa ser transformado em formas minerais como amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). A fixação direta do nitrogênio atmosférico só é realizada por algumas bactérias nitrificantes, rizóbios e algas cianofíceas (BAIRD; CANN, 2002). As formas minerais inorgânicas de interesse as plantas são adquiridas através da mineralização da matéria orgânica e da fixação biológica do nitrogênio atmosférico (VIEIRA, 2017). A mineralização ocorre após a fixação do nitrogênio, nesse processo os microrganismos heterotróficos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia e transformam a NH_3 em NH_4^+ (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Um complemento a este processo é a fixação industrial, processo que converte o N_2 em compostos nitrogenados. Isso é feito através do processo de Haber-Bosch, que envolve a reação do oxigênio e do hidrogênio em condições de alta pressão e temperatura. A reação produz NH_3 , que pode ser usada diretamente como fertilizante ou como matéria-prima para a produção de outros compostos nitrogenados, como nitratos e ureia (RODRIGUES *et al*, 2017).

Dentro do ciclo temos ainda a nitrificação, processo em que o NH_4^+ é oxidado para formar NO_3^- . Dessa forma as bactérias nitrificantes utilizam a NH_3 como fonte de energia e CO_2 como fonte de carbono (NANES, 2017). E em seu processo final, tem-se a desnitrificação, onde o NO_3^- é reduzido a N_2O ou N_2 , este processo é realizado por microrganismos anaeróbios presentes no solo que, durante a respiração, utilizam nitrato e compostos de carbono como fonte de energia, liberando o nitrogênio gasoso para a atmosfera e completando o ciclo biogeoquímico desse elemento (VIEIRA, 2017).

3.4 Ureia e ureia com inibidor de urease

A ureia é um fertilizante nitrogenado amplamente utilizado na agricultura e em todo o mundo, sendo considerado o principal adubo sólido do mercado. Sua preferência está relacionada a alta concentração de nitrogênio em sua composição (45%), ao seu baixo custo em relação a outros fertilizantes e a sua facilidade de aplicação. Além disso, os produtos resultantes da hidrólise da ureia são facilmente assimilados pelas plantas, o que contribui ainda mais para sua popularidade na agricultura (CANTARELLA; TRIVELIN, 2008).

Quando se aplica ureia no solo, a mesma é hidrolisada pela enzima urease, esta enzima é produzida por bactérias e fungos do solo. A hidrólise resulta na formação de carbonato de amônio $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ e hidroxila (OH^-), o $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ é instável e forma NH_3 , CO_2 e água (H_2O), a NH_3 irá reagir com as H^+ e formará NH_4^+ (VIEIRA, 2017).

Fertilizantes que possuem nitrogênio amoniacal elevam o pH do solo ao redor do local aplicado cerca de 3 dias após a aplicação (CANTARELLA *et al*, 2018), e dependendo do pH

do solo, os mesmos são volatilizados. O íon NH_4^+ tem predominância em condições de solo com pH ácido já a sua forma gasosa, a NH_3 predomina em condições de pH alcalino (OUYANG; MACKENZIE; FAN, 1998; ERNANI; STECKLING; BAYER, 2001).

Dessa forma, existem alguns fatores que contribuem ao seu aproveitamento. Em condições de clima, temperatura e pH normais, o NH_4^+ resultante da hidrólise é convertido em nitrito (NO_2^-) e posteriormente, em NO_3^- pelo processo de nitrificação, sendo este, absorvido pelas plantas, mas em condições de pH elevado a OH^- reage com o NH_4^+ causando perda de nitrogênio por volatilização (COSTA *et al*, 2004).

Temperaturas elevadas, próximo ou acima de 30°C , podem proporcionar perdas de até 50% do total aplicado de N- NH_3 (CANTARELLA, 2007). Em condições de solo úmido, com presença de orvalho ou precipitações baixas e, temperaturas elevadas a volatilização ocorre pelo processo de evaporação, quando o solo está secando, e em casos de solo já seco a hidrólise da ureia não ocorre (CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

Dessa forma, segundo Kissel *et al* (2004), para evitarmos as perdas de N- NH_3 , precipitações entre 10 a 20 mm já seriam consideradas suficientes, uma vez que possibilitam a incorporação da ureia no solo.

A volatilização pode ser ainda potencializada em sistemas de plantio direto em ureia aplicada a lanço, pois a atividade da enzima urease é maior em plantas, resíduos vegetais, solos com altos teores de matéria orgânica, pois ela é sintetizada por microrganismos e solos com elevada umidade (CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

Dessa forma, tem se buscado alternativas que possibilitem reduzir estas perdas, uma alternativa seria sua incorporação, porém, esta prática é pouco usual devido ao difícil manejo, aumento do custo operacional e por não ser considerada sustentável. Neste sentido, tem-se buscado outras alternativas que possibilitem o aumento da eficiência dos fertilizantes, tornando estes de liberação lenta ou controlada e fertilizantes estabilizados (CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

Uma alternativa que tem se tornado usual é a mistura da ureia com compostos químicos, sendo o NBPT um dos mais utilizados. Este tem por função a inibição da enzima urease, sendo empregado em fontes que possuem alto potencial de perdas de nitrogênio por volatilização (CANTARELLA; TRIVELIN, 2008).

Quando misturado com a ureia, o NBPT reduz a velocidade e o pico da hidrólise, permitindo uma liberação mais estabilizada, essa estabilidade pode durar de 3 a 15 dias, o tempo irá depender da umidade e da temperatura, em temperaturas elevadas e sem ocorrência de precipitação seu efeito pode ser reduzido (CANTARELLA; MARCELINO, 2007).

3.5 Nitrato de amônio

O nitrato de amônio é produzido através da reação da amônia com o ácido nítrico. Este fertilizante possui concentração de 27% de nitrogênio em sua composição, sua importância na agricultura está atrelada principalmente a sua formulação, pois está 50% na forma amoniacal e 50% na forma nítrica (FRANCO; NETO, 2007).

O NO_3^- presente na formulação do fertilizante está em sua forma iônica, sendo está preferencialmente absorvida pelas plantas, dessa forma sua absorção ocorre de maneira mais rápida, reduzindo as perdas de nitrogênio (FRANCO; NETO, 2007), já a amônia passa pelo processo de nitrificação onde será oxidada para formar nitrato (NO_3^-), dessa forma as bactérias utilizam a amônia como fonte de energia e dióxido de carbono (CO_2) como fonte de carbono (NANES, 2017), porém, a NH_3 é mais instável e, em condições desfavoráveis de clima e pH de solo ocorrem perdas na forma de N-NH_3 (COSTA *et al*, 2004).

A perda de nitrogênio deste fertilizante também é possível de ocorrer em solos sem oxigenação e em solos saturados, porém, por meio da desnitrificação, um processo realizado por microrganismos, onde, neste caso o NO_3^- será reduzido a N_2O ou N_2 , sendo estes perdidos para a atmosfera na forma de gases, vale destacar que o óxido nítrico é um dos principais contribuintes ao efeito estufa (ALCARDE; GUIDOLIN; LOPES, 1998).

Segundo os autores (RODRIGUES *et al*, 2012) em trabalho onde utilizaram as fontes uréia perolada, Ureia + NBPT, uréia + 0,15% de Cu_2^+ e 0,4% de B, uréia + enxofre e nitrato de amônio, o nitrato de amônio se destacou tendo menor volatilização.

3.6 Demanda de nitrogênio na cultura do trigo

O fornecimento de nitrogênio para a cultura do trigo é uma prática indispensável ao seu bom desenvolvimento, uma vez que os solos agricultáveis são pobres nutricionalmente quando se trata desse nutriente (PRANDO *et al*, 2013).

Esta adubação desempenha um papel indispensável no cultivo do trigo. Sua ausência pode ter efeitos negativos na evapotranspiração e na eficiência do uso da água, como afirmado por Nielsen e Halvorson (1991). Além disso, a deficiência desse nutriente pode afetar a capacidade da planta em interceptar a radiação solar, provocando uma diminuição da eficiência do uso da radiação, conforme observado por Abbate, Andrade e Culot (1995).

Outro aspecto importante é que este é um nutriente essencial para o desenvolvimento dos componentes de rendimento do trigo. A adubação nitrogenada no momento correto pode promover um aumento significativo no número de espiguetas por espiga e no número de grãos

por espiga. Esses efeitos positivos demonstraram a importância desse nutriente na produção e no rendimento da cultura do trigo, sendo assim, as quantidades e fontes adequadas são essenciais ao incremento da produção (BREDEMEIER; MUNDSTOCK, 2001).

A época de aplicação do nitrogênio no trigo está diretamente relacionada ao estágio de crescimento e desenvolvimento da planta, dessa forma se faz fundamental conhecer sua fenologia para adotar o manejo mais adequado. Em particular, é fundamental que o nitrogênio esteja disponível para a planta durante seu estágio de perfilhamento, promovendo assim, maior rendimento de grãos (ACORSSI; FERREIRA, 2009).

Geralmente as quantidades de nitrogênio aplicadas no trigo ficam na faixa de 60 a 120 kg ha⁻¹, sendo que esta irá variar conforme a matéria orgânica do solo, da cultura anterior, do clima e da expectativa de produção, esta quantidade ainda é dividida no plantio e em cobertura (BONA; MORI; WIETHÖLTER, 2016).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e clima

O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Dois Vizinhos na região sudoeste do estado do Paraná, situada a latitude 25°41'50'' S; longitude 53°05'56'' W, com altitude de 530 m.

O clima da região é classificado, segundo Köppen, como tipo Cfa, subtropical úmido, com mês mais frio entre 18 e -3 °C, chuvas bem distribuídas em todos os meses do ano e verão quente com temperatura do mês mais quente superior a 22 °C (ALVARES *et al*, 2013).

Previamente ao plantio do trigo foi realizado coleta de solo nas camadas de 0 – 10 cm para sua caracterização. O tipo de solo predominante no local é o Latossolo Vermelho (773 g/kg de argila, 224 g/kg de silte e 3 g/kg de areia), caracterizando solo profundo, poroso e bem permeável (EMBRAPA, 2006), com Densidade do solo de 1,15 g dm⁻³.

Figura 2 – Análise do solo nas camadas de 0 - 10 cm.

Análise química inicial do solo												
pH H ₂ O	Índice SMP	P	K	MO	V	Al	Ca	Mg	ARGILA	H+Al	CTC	S
		mg dm ³		%		cmolc dm ³		%	cmolc dm ³	mg dm ³		
6,1	6,6	11,9	109,48	3,8	76,2	0,0	7,7	2,2	77,3	3,18	13,36	10,18

Fonte: Autoria própria (2023).

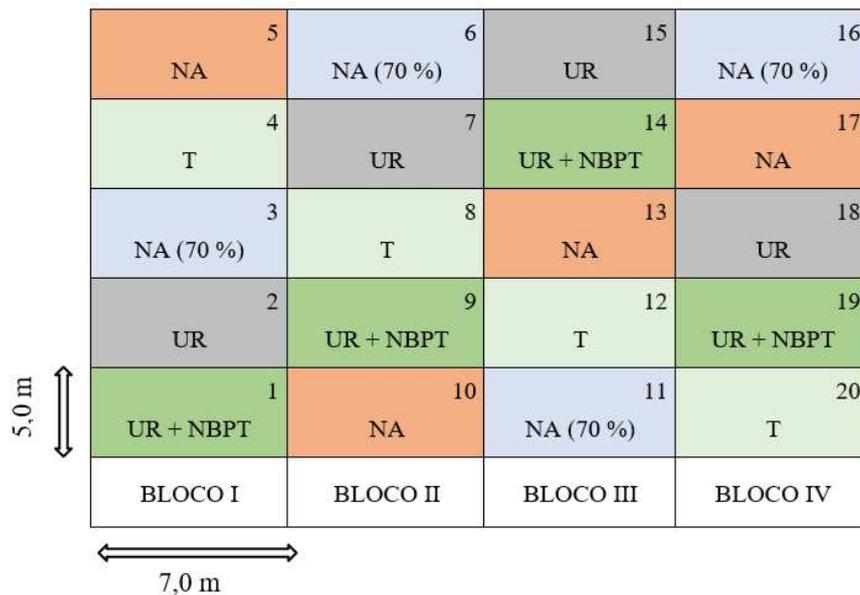
4.2 Tratamentos e Delineamento experimental

Para a realização do experimento, foi utilizado o delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições, o qual constituiu-se de cinco tratamentos, sendo estes:

- UR: ureia (45 % de N);
- UR+NBPT: ureia com inibidor NBPT (45 % de N);
- NA: nitrato de amônio (27 % de N),
- NA (70 %): 70 % da dose de nitrato de amônio (27 % de N) e;
- T: testemunha, sem nitrogênio.

Dessa maneira, obteve-se um total de 20 unidades amostrais com dimensões de 7,0 x 5,0 metros para cada parcela, totalizando área de 35 m².

Figura 3 – Croqui da área experimental conduzida em delineamento de blocos casualizados em função das fontes de nitrogênio.



Fonte: Autoria própria (2023).

A dose por hectare foi de 75 kg de N para cada fonte de fertilizante, sendo:

- UR: ureia (45 % de N) com 166,7 kg ha⁻¹;
- UR+NBPT: ureia com inibidor (45% de N) com 166,7 kg ha⁻¹;
- NA: dose cheia do nitrato de amônio (27 % de N) com 277,8 kg ha⁻¹;
- NA (70 %): 70 % da dose de nitrato de amônio (27 % de N) com 194,4 kg ha⁻¹ e;
- T: testemunha.

Como as aplicações foram realizadas nas bases de PVC, e sua área é de 0,02547m², os cálculos foram realizados considerando a área da base e convertidos em gramas. Dessa forma, as quantidades aplicadas em cada base foram as seguintes:

- UR: ureia (45 % de N) com 0,425 gramas;
- UR+NBPT: ureia com inibidor (45% de N) com 0,425 gramas;
- NA: dose cheia do nitrato de amônio (27 % de N) com 0,708 gramas;
- NA (70 %): 70 % da dose de nitrato de amônio (27 % de N) com 0,495 gramas e;
- T: testemunha.

4.3 Manejo da cultura de trigo

O trigo foi plantado mecanicamente sobre resteva de soja da safra anterior, em sistema plantio direto, após uso de herbicida glifosato, realizado no dia 20 de junho de 2023. A cultivar de trigo utilizada foi a Tbio Calibre da Biotrigo Genética, com características agronômicas de ciclo superprecoce, estatura de planta baixa, médio perfilhamento e peso de mil sementes de aproximadamente 36 g (BIOTRIGO GENÉTICA, 2018). A densidade de semeadura utilizada foi de 150 kg de sementes ha⁻¹ com espaçamento de 0,17 m entre linhas. O fertilizante utilizado foi o formulado 08-20-15 (N-P₂O₅-K₂O), na dose de 250 kg ha⁻¹.

Em relação aos tratamentos fitossanitários fez-se a primeira aplicação com Tilt (fungicida) + Engeo (inseticida). A segunda com Priori Xtra (fungicida) e a terceira aplicação novamente com Tilt (fungicida). Para a realização das aplicações, as câmaras utilizadas na coleta eram cobertas com sacos plásticos para que não houvesse nenhum tipo de interferência nos resultados avaliados. Não foi realizada dessecação do trigo e o mesmo foi colhido no dia 29 de setembro de 2023.

4.4 Avaliação da volatilização de amônia

Para determinarmos as perdas de nitrogênio na forma amoniacal (N-NH₃), foram dispostos em cada parcela, câmaras semiabertas de PVC. Este método foi descrito por Nönmik (1973) e posteriormente adaptado por Cantarella *et al*, (2003). Estas bases possuem formato cilíndrico com dimensões de 0,195 m de diâmetro e 0,10 m de altura.

4.4.1 Instalação das bases e câmaras para a captura da amônia

Em cada uma das 20 parcelas, foram instaladas 10 bases de PVC parcialmente inseridas no solo. Estas bases foram instaladas nas entrelinhas da cultura do trigo, dentro de

cada base foram aplicados os fertilizantes nitrogenados e, posteriormente, as bases serviram de sustentação para as câmaras de captura de amônia.

A aplicação dos fertilizantes, no interior das bases foi realizada no dia 26 de julho de 2023, pois as condições meteorológicas indicavam chuva e, nesse momento a cultura se encontrava no estágio de perfilhamento, ideal para aplicação.

Um dia após a aplicação das fontes nitrogenadas, foram realizadas a instalações das câmaras para captura da amônia volatilizada. Estas câmaras possuem dois suportes onde foram dispostas duas esponjas de polipropileno. Para que as esponjas pudessem capturar a amônia volatilizada, estas eram embebidas com 90 mL de uma solução composta por ácido fosfórico (50 mL) e glicerina (40 mL), diluídos em 1 L de água destilada.

A esponja colocada na parte superior das câmaras, disposta a uma altura de 30 cm do solo, era responsável pela captura de possíveis contaminações de NH_3 vindas da atmosfera, já a esponja inferior, disposta a uma altura de 15 cm do solo, foi a responsável pela captura da NH_3 emitida pelo solo.

Fotografia 1 - Coletores semiabertos de PCV para instalação das esponjas de captura de NH_3 volatilizada.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.4.2 Coleta das amostras a campo

A volatilização de N- NH_3 foi avaliada durante 21 dias, num período que se estendeu entre 28 de julho e 16 de agosto de 2023. Nos primeiros cinco dias, as coletas seguiram um intervalo de 24 horas, o qual aumentou com o decorrer do tempo, portanto, foram feitas as coletas nos dias: 28, 29, 30 e 31 de julho e 01, 03, 05, 08, 11 e 16 de agosto, iniciadas dois dias após a aplicação dos fertilizantes (DAA).

Para cada avaliação, foram realizadas as trocas de esponjas, igualmente embebidas em solução com ácido e glicerina. A esponja do topo, a cada duas coletas, era embebida com nova

solução. Já as esponjas inferiores eram submetidas a análise, estas eram então coletadas e armazenadas em sacos plásticos e armazenadas em refrigerador, para posterior quantificação da NH_3 capturada.

Após a coleta das esponjas, realizava-se a transferência das câmaras coletoras para a base seguinte (figura 2) para a exposição do solo e do fertilizante nitrogenado as condições ambientais.

Fotografia 2 - Procedimento de troca de câmaras entre as bases para captura da amônia volatilizada.



Fonte: Autoria Própria (2023).

4.5 Extração da amônia

O processo de extração iniciou com a adição de 410 mL de solução de cloreto de potássio (KCl) 1M em cada saco plástico com a esponja coletada na câmara, deixando reagir por uma hora. Após esse período, a solução de KCl juntamente com a esponja era transferida para uma bandeja, na qual era realizada a lavagem da esponja de forma consecutiva para a extração de todo o conteúdo presente na esponja.

Esta solução foi transferida para um balão volumétrico de 500 mL, onde seu volume foi preenchido com KCl 1 M, e a solução homogeneizada. Uma alíquota de 40 mL foi retirada e armazenada em freezer até análise de destilação.

4.6 Destilação e Titulação das amostras

Para a destilação e titulação foram retirados 20 mL de cada amostra que foram transferidos para um tubo de destilação com a adição de 0,20 g de óxido de magnésio (MgO) previamente calcinado a 700°C. O tubo de ensaio, junto com o MgO foi posto no destilador de nitrogênio. Ao lado, para a captura do volume destilado, se usava um erlenmeyer com 5 mL de solução indicadora de ácido bórico 2 %, esta solução trocava da cor, indo de rosa para verde claro no decorrer do processo, o qual era finalizado quando o volume destilado atingisse aproximadamente 30-35 mL.

Após a destilação, a amostra foi titulada com solução padronizada de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,0025 M. O ponto de viragem da amostra era quando a solução de ácido bórico retorna do verde para a cor lilás. O volume gasto em mL de ácido para titulação foi anotado para posterior cálculo da concentração de amônia.

4.7 Precipitação e temperatura

Para a geração do gráfico de precipitação e temperatura (gráfico 1), foram coletados dados através do instituto nacional de meteorologia (INMET). Foram baixados os dados históricos do ano de 2023, da cidade de Dois Vizinhos e, analisados os dias referentes as coletas para geração das informações (INMET, 2023).

4.8 Análise estatística dos dados

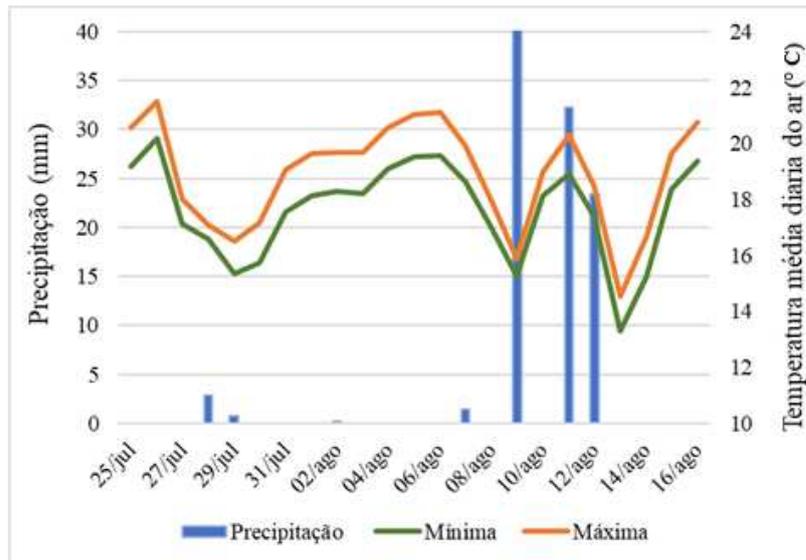
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as medias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a um nível de 5 % de probabilidade de erro ($p > 0,05$), analisados pelo programa Rbio (BHERING, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Precipitação e temperatura

O período de coletas de N-NH₃ estendeu-se do dia 28 de julho a 16 de agosto de 2023. No gráfico 1 estão representados os dados de precipitação e temperatura do ar ao longo dos dias.

Gráfico 1 – Dados de precipitação e temperatura no período de coletas de N-NH₃ – Dois Vizinhos PR



Fonte: INMET (2023).

A temperatura do ar no momento da aplicação dos fertilizantes, no dia 26 de julho às 08:00 h, foi de 17,4° C. Em 28 de julho de 2023, dia correspondente a primeira coleta, foi registrada a ocorrência de precipitação de 2,8 mm. No dia 29 de julho - segunda coleta - a precipitação foi de 0,8 mm. As demais precipitações foram registradas nos dias 02, 07, 09, 11 e 12 de agosto totalizando 100 mm (INMET, 2023), sendo que os dias 08, 11 e 16 correspondem respectivamente a oitava, nona e décima coleta.

5.2 Taxa de volatilização diária

A volatilização da NH₃ foi influenciada pela temperatura, precipitação e umidade no decorrer dos dias após aplicação, em que os fertilizantes ficaram expostos aos efeitos das condições climáticas do período. Observa-se diferença significativa nas taxas de volatilização de NH₃ a partir do terceiro dia após a aplicação dos fertilizantes até o 16º dia, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Taxa diária de volatilização de NH₃ dos fertilizantes (testemunha:T; ureia:UR; ureia + NBPT: UR + NBPT; nitrato de amônio: NA e nitrato de amônio 70 % da dose: NA 70 %). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2023.

DAA	Fontes de fertilizantes nitrogenados					
	T	UR	UR + NBPT	NA	NA (70 %)	
	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹					
2 DAA	0,26 ns	0,61	0,19	0,31	0,37	
3 DAA	0,23 b	2,68 a	0,41 b	0,11 b	0,19 b	
4 DAA	0,28 bc	1,90 a	0,83 b	0,19 c	0,44 bc	
5 DAA	0,16 b	0,81 a	0,86 a	0,16 b	0,29 b	
6 DAA	0,08 c	0,53 b	0,95 a	0,08 c	0,08 c	
8 DAA	0,10 b	0,29 ab	0,47 a	0,09 b	0,11 b	
10 DAA	0,06 c	0,23 b	0,42 a	0,12 bc	0,15 bc	
13 DAA	0,06 c	0,19 b	0,36 a	0,09 c	0,10 bc	
16 DAA	0,03 b	0,09 ab	0,16 a	0,03 b	0,08 ab	
21 DAA	0,03 ns	0,05	0,06	0,05	0,06	

Médias seguidas por letras diferentes na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo, médias não diferem segundo o teste Tukey (p>0,05).

DAA: Dias após a aplicação.

O tratamento UR se destaca com a perda mais acelerada de N-NH₃ no 3° DAA, alcançando um pico de 2,68 kg ha⁻¹ dia⁻¹. As taxas mais elevadas de volatilização se concentraram nos primeiros 5 DAA do fertilizante e posteriormente, foram decaindo gradativamente chegando no 21° dia com valores próximos de zero, não apresentando diferença estatística quando comparada aos demais tratamentos. Esse resultado já era esperado uma vez que a ureia convencional se trata de um fertilizante sem tecnologia empregada e por consequência dispõe de uma rápida hidrólise da ureia após seu contato com o solo e umidade.

Resultados semelhantes decorrentes da taxa de volatilização são observados no estudo realizado por Viero *et al* (2014) em que se avaliou a volatilização de diferentes fertilizantes nitrogenados no trigo e no milho sob plantio direto. No trigo foram avaliadas as seguintes fontes: uréia, uréia com inibidor de urease (NBPT), fertilizante líquido, nitrato de amônio e sulfato de amônio na dose de 50 kg ha⁻¹ durante 19 dias. No inverno de 2009 a temperatura média registrada foi de 13,8° C e com ocorrência de precipitação de 83 mm, dos quais 90 % caíram entre os 3°e 6° dia após a fertilização. Já o inverno de 2010, em que se assemelhou com o experimento em estudo, foi caracterizado por um período seco e quente, 2,1° C mais quente que o anterior e sem ocorrência de chuva nos 19 dias após a fertilização. Os resultados encontrados referente as taxas diárias de volatilização de N-NH₃ foram maiores até o 5° dia

após a fertilização em todos os tratamentos, os quais corroboram com os encontrados neste estudo, até mesmo quando tratando-se do experimento conduzido no ano de 2009 (com chuva). Segundo o autor (VIERO *et al*, 2014), considerando a ausência de chuva no ano de 2010, a solubilização dos fertilizantes pode ter sido influenciada pela ocorrência do orvalho noturno.

Sendo assim, cabe salientar que a presença de umidade facilita a dissolução dos grânulos de ureia, permitindo um maior contato com o solo e, facilitando a atividade da enzima urease. No presente estudo, logo após a aplicação dos fertilizantes a precipitação foi baixa, sendo de 2,8 mm como visto no gráfico 1, porém, essa pequena quantidade já foi o suficiente para que o processo de hidrólise pudesse se iniciar o que provavelmente resultou em um aumento do pH na região de dissolução do grânulo e conseqüente favoreceu à formação de N-NH_3 , o que conseqüentemente se perdeu para a atmosfera logo nos primeiros dias.

O segundo tratamento com maiores taxas de volatilização foi o a UR + NBPT, onde alcançou um pico de $0,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no 6° DAA, diferindo estatisticamente da UR. Ainda, diferenças estatísticas são observadas no grupo UR + NBPT nos dias 3 e 4 após a aplicação, onde ocorreram menores taxas de volatilização quando comparada a UR. No 10° e 13° DAA, a UR + NBPT teve maiores taxas de volatilização em relação aos demais fertilizantes, visto que estes já apresentavam menores taxas de perdas; resultado esse já esperado, uma vez que a função dos inibidores é justamente retardar a ação da enzima urease e por conseqüência a hidrólise e o pico de volatilização. Segundo Cantarella e Marcelino (2007) a adição de NBPT reduz a velocidade e o pico da hidrólise, permitindo uma liberação mais estabilizada, essa estabilidade pode durar de 3 a 15 dias. Tasca *et al* (2011) também relatou em seu trabalho que o uso do NBPT retardou o pico de perda máxima por volatilização, porém, não influenciou nas perdas finais, esse resultado condiz com o encontrado no presente estudo, uma vez que, apesar do NBPT retardar o pico de maior perda, não houve diferença significativa no total acumulado. Ainda no estudo de Tasca *et al* (2011) houve uma máxima volatilização dos fertilizantes quando as condições de temperatura se encontravam aos 35° C ao passo de que em temperaturas a 18° C as perdas máximas diárias por volatilização da ureia foram 4,6 vezes menores. Isso pode ajudar a explicar as baixas taxas de volatilização encontradas nesse estudo, uma vez que as avaliações foram realizadas em um período onde a temperatura média se encontrava aos 17,7° C, proporcionando baixas taxas de volatilização, pois, temperaturas mais altas podem acelerar a velocidade da hidrólise pelo aumento da atividade da enzima urease (TASCA *et al*, 2011).

Para o NA e o NA (70 %), os picos ocorreram no 2° e 4° DAA, respectivamente, não havendo diferença estatística entre ambos no período de ensaio, bem como quando comparados com a testemunha; logo, o NA destaca-se como o fertilizante com menores taxas

de volatilização de N–NH₃, cujo pico referencia-se em 0,31 kg N ha⁻¹ dia⁻¹. Esse resultado pode ser explicado por sua composição, apresentando-se 50% na forma amoniacal e 50% na forma nítrica, responsável pela menor acidificação do solo (FRANCO; NETO, 2007). Estes resultados corroboram com os encontrados por Chagas *et al* (2017) em que se avaliou em pastagens, as perdas de amônia dos fertilizantes: ureia convencional, ureia protegida com polímero, ureia com NBPT e nitrato de amônio, aplicados em dose de 100 kg ha⁻¹ a lanço. No estudo, as perdas por volatilização iniciaram-se após o primeiro dia da aplicação dos fertilizantes e, destacou-se com as maiores taxas de volatilização a ureia comum seguido da ureia protegida com polímero, ureia com NBPT e por fim o nitrato de amônio, cujo fertilizante teve apenas 2,5 % de nitrogênio volatilizado. Outro trabalho que pode ser observado resultados semelhantes é o de Rodrigues *et al* (2012) em que também se destaca o nitrato de amônio com as menores perdas por volatilização.

5.3 Perdas de amônia por coleta

Em relação as perdas por coleta, novamente observa-se diferença estatisticamente significativa a partir do terceiro dia após a aplicação dos fertilizantes até o 16º dia.

Tabela 2 – Perdas (kg ha⁻¹ dia⁻¹) de amônia volatilizada por coleta dos fertilizantes (testemunha:T; ureia:UR; ureia + NBPT: UR + NBPT; nitrato de amônio: NA e nitrato de amônio 70 % da dose: NA 70 %). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, PR, 2023.

DAA	Fontes de fertilizantes nitrogenados				
	T	UR	UR + NBPT	NA	NA (70 %)
	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹				
2 DAA	0,26 ns	0,61	0,19	0,31	0,37
3 DAA	0,23 b	2,68 a	0,41 b	0,11 b	0,19 b
4 DAA	0,28 bc	1,90 a	0,83 b	0,19 c	0,44 bc
5 DAA	0,16 b	0,81 a	0,86 a	0,16 b	0,29 b
6 DAA	0,08 c	0,52 b	0,95 a	0,08 c	0,08 c
8 DAA	0,20 b	0,58 ab	0,95 a	0,18 b	0,23 b
10 DAA	0,13 c	0,47 b	0,85 a	0,24 bc	0,30 bc
13 DAA	0,19 c	0,58 b	1,07 a	0,28 c	0,31 bc
16 DAA	0,08 b	0,28 ab	0,49 a	0,08 b	0,23 ab
21 DAA	0,15 ns	0,26	0,29	0,27	0,28

Médias seguidas por letras diferentes na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns: não significativo, médias não diferem segundo o teste Tukey (p>0,05). DAA: Dias após a aplicação.

Analisamos as perdas de amônia por coleta, possibilitando observar que a UR se destaca novamente como o fertilizante com maiores perdas de N-NH₃. Após seu pico máximo de volatilização, as perdas reduziram e a partir da 6^o coleta as perdas se apresentam mais estáveis. Ao atingir o pico de volatilização, as perdas da UR decresceram. No entanto, é no 6^o dia que as perdas do fertilizante UR + NBPT se intensificaram, apresentando sua perda máxima no 13^o DAA, com volatilização de 1,07 kg ha⁻¹. Segundo Cantarella e Trivelin (2008), o NBPT pode retardar o pico de volatilização entre 3 a 14 dias.

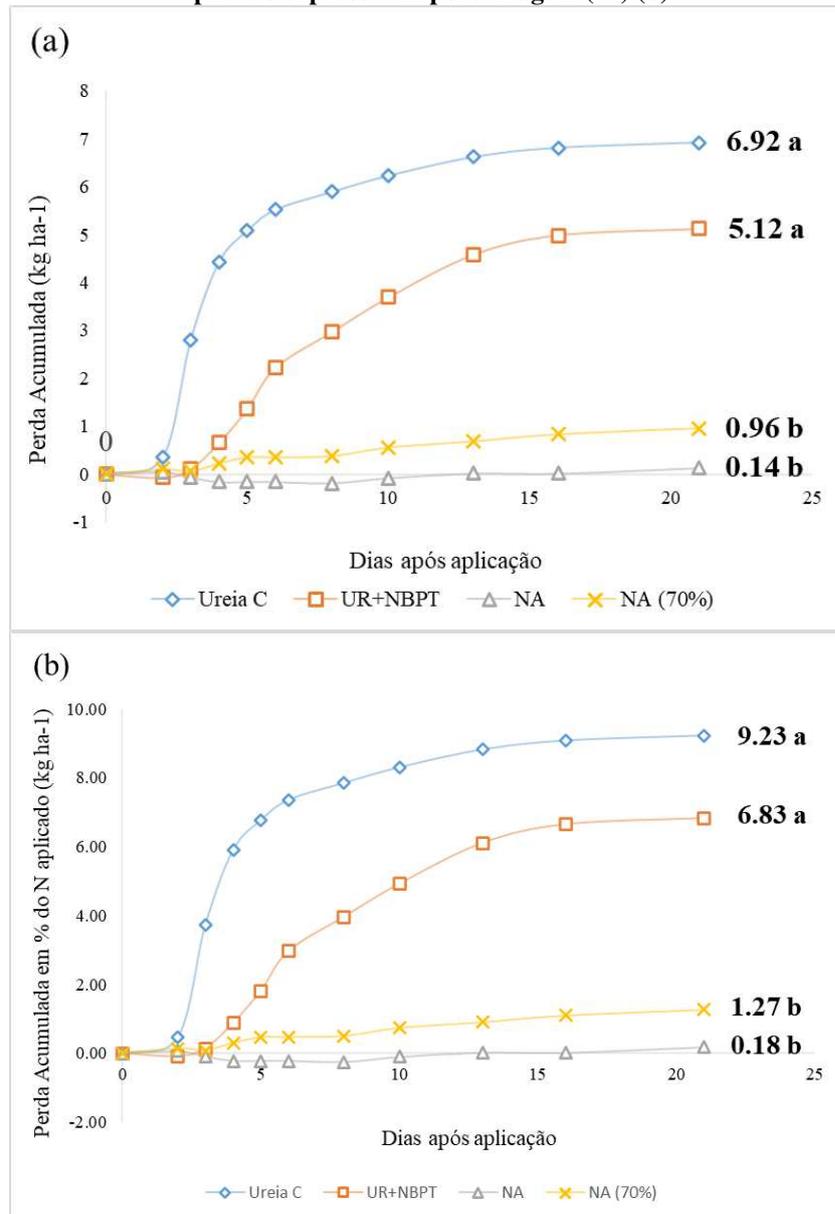
Os grupos com menores perdas por coleta foram os do NA e NA (70 %), não apresentando diferenças estatisticamente significativas entre si, bem como quando comparadas ao grupo T; por outro lado, houve diferenças estatísticas quando comparados aos demais grupos experimentais, sendo o pico de volatilização do grupo experimental NA no 1^o DAA, e o grupo experimental NA (70 %) no 4^o DAA. Tanto o nitrato de amônio quanto o nitrato de amônio 70 % perderam nitrogênio em taxas menores e mais constantes durante as avaliações. Segundo Cantarella *et al* (2007) ao aplicarmos o nitrato de amônio no solo, ocorre a formação de NO₃⁻ e, para cada um ocorre a liberação de íons 2H⁺ para a solução do solo, resultando na queda do pH contribuindo para a redução da formação de NH₃.

O grande potencial de hidrólise da ureia, quando aplicada em superfície, juntamente com fatores como as temperaturas, em que o inverno de 2023 teve médias de 17,7° C e, ausência de fortes precipitações nos primeiros dias, contribuiu para as maiores perdas de N-NH₃ nos primeiros dias de experimento. Logo, nos dias 08, 09, 10, 11 e 12 de agosto, correspondendo as últimas três coletas de amônia, ocorreram precipitações em que se somaram 101 mm, porém, não foram registrados novos picos de emissão. Aos 21 DAA, comparando os fertilizantes com a testemunha, não houve diferenças estatísticas em relação as perdas de amônia.

5.4 Perda total acumulada dos fertilizantes

Quanto a perda acumulada, diferenças estatisticamente significativas são observadas entre os tratamentos com ureia e nitrato de amônio (gráfico 2).

Gráfico 2 - Perda acumulada de NH₃ dos fertilizantes (a) e perda acumulada de NH₃ em relação ao N aplicado expressa em porcentagem (%) (b).



Médias seguidas por letras diferentes, para cada variável, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p > 0,05$).

Ureia C: Ureia comum (UR); UR+NBPT: ureia com inibidor; NA: nitrato de amônio e NA (70 %): 70 % da dose de nitrato de amônio.

Os fertilizantes UR e UR + NBPT se mantiveram superiores aos demais em relação as perdas de N, se diferenciando estatisticamente do NA e NA (70 %). Para a UR, a perda total acumulada foi de 6,92 kg ha⁻¹, o que corresponde a uma perda de 9,23 % do N aplicado. Já para a UR + NBPT observa-se um total de perda total de 5,12 kg ha⁻¹, correspondendo a 6,83 % ao final dos 21 dias de ensaio. Dessa maneira é evidente que a adição de NBPT não influenciou na perda acumulada de N-NH₃, onde, as perdas ocorrem na mesma intensidade e apenas de forma mais espaçada.

Em um estudo realizado por Cancellier (2013) avaliou-se na cultura do milho, a volatilização da ureia, ureia + NBPT, ureia + Cu + B e ureia revestida por enxofre e polímeros. No período de avaliação, 3 DAA dos fertilizantes houve uma precipitação de 3,2 mm e as temperaturas se encontravam entre mínima de 16 e máxima de 30° C. A ureia + NBPT apresentou perda de 7 % do nitrogênio aplicado, se assemelhando aos resultados encontrados, enquanto que a ureia comum teve um acumulado de 12 %, superior ao encontrado no estudo. Dito isso, no estudo de Cancellier (2013) as maiores perdas por volatilização de amônia do fertilizante ureia comum pode ser explicada possivelmente pelas altas temperaturas registradas e a adição de NBPT à ureia provocou atraso e diminuição do início da volatilização de N-NH₃.

Em contrapartida, em estudo realizado por Boaretto *et al* (2004) conduzido durante o inverno, na cultura do trigo, relatou perdas por volatilização da ureia que variaram entre 5 a 12 % do nitrogênio aplicado, assemelhando-se mais aos encontrados no estudo, uma vez que no experimento conduzido por Boaretto *et al* (2004) a temperatura média era de 21° C.

As menores perdas de nitrogênio foram registradas a partir das fontes NA e NA (70 %), acumulando perdas de 0,14 kg ha⁻¹ correspondendo a 0,18 % de N volatilizado e 0,96 kg ha⁻¹ correspondendo a 1,27 %, respectivamente.

Resultados semelhantes são encontrados no estudo de Viero (2011), realizado na cultura do milho e do trigo na região de Guarapuava em que se avaliou dois experimentos durante duas safras consecutivas. Na primeira safra de trigo (2009) as perdas de nitrato de amônio representaram pouco mais de 1 % do nitrogênio aplicado enquanto que na safra seguinte (2010) não representaram nem 0,5 %. Vale ressaltar que, durante o experimento de inverno, na safra de 2009, a precipitação acumulada foi de 83 mm concentrando-se entre o terceiro e sexto dia após aplicação dos fertilizantes e a temperatura média diária foi de 13,8° C, enquanto que em 2010 não foi registrado nenhum evento de chuva durante os 20 dias de experimento com temperatura média de 15,9° C.

6 CONCLUSÃO

O fertilizante ureia (UR) apresentou as maiores perdas de nitrogênio via volatilização de amônia, representando uma perda acumulada de $6,92 \text{ kg ha}^{-1}$, o que corresponde a $9,23 \%$ do nitrogênio total aplicado.

A ureia + NBPT foi o segundo fertilizante com as maiores perdas, representando um total de $5,12 \text{ kg ha}^{-1}$, o que corresponde a $6,83 \%$ do nitrogênio aplicado, ou seja, o NBPT foi capaz de retardar o pico de volatilização de amônia (NH_3), apresentando uma perda mais estabilizada com o passar dos dias, porém não proporcionou menores perdas quantitativas de nitrogênio ao final dos 21 dias, quando comparada com a UR.

As menores perdas de nitrogênio, via volatilização de NH_3 , foram registradas quando utilizado o fertilizante nitrato de amônio (NA) e nitrato de amônio 70% da dose (NA 70%) e, ambos não se diferiram em relação as perdas até mesmo quando comparados com a testemunha.

REFERÊNCIAS

- ABBATE, P. E.; ANDRADE, F. H.; CULOT, J. P. Os efeitos da radiação e nitrogênio no número de grãos em trigo. **The Journal of Agricultural Science**, 1995. 124. 351 - 360.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os estudos e a eficiência das adubações. São Paulo: **Associação Nacional para Difusão do Adubo (ANDA)**. Boletim Técnico, n. 3, 1998.
- ACORSSI, E. E.; FERREIRA, D. T. L. Resposta produtiva da cultura do trigo na cultivar CD 104 submetida a diferentes dosagens de adubação nitrogenada aplicada em cobertura. **Cultivando o Saber**, v. 2, n. 2, p. 165-173, 2009.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- BHERING L.L. **Rbio: A Tool For Biometric And Statistical Analysis Using The R Platform**. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17: 187-190p, 2017.
- BIOTRIGO GENÉTICA. Tbio Calibre. **Características agrônomicas**. 2018. Disponível em: <https://biotrigo.com.br/cultivares/tbio-calibre/>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- BOARETTO, A. E.; SPOLIDORIO, E. S.; FREITAS, J. G. D.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; CANTARELLA, H. Destino da 15N-ureia aplicada à cultura da sucessão trigo-soja. **Bragantia**, v. 63, pág. 265-274, 2004.
- BORTOLI, M.; KUNZ, A.; SOARES, H. M.; BELLI, P.; COSTA, R. H. R. D. **Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes**. Engenharia Sanitária Ambiental, v. 17, n. 1, p. 01-06, Mar. 2012.
- BRASIL. **Decreto n. 4.954, de 14 de janeiro de 2004**. Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. Brasília, 14 de janeiro de 2004. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm. Acesso em 01 de maio de 2023.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). Coordenação-Geral de Ciência do Clima e Sustentabilidade (CGCL). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. 2022. Disponível em: Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>. Acesso em: 12 de maio de 2023.
- BRASIL. **Plano Nacional de Fertilizantes: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. CONFERT n. 5, Brasília, DF, de 31 de jul. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/confert/pnf/pnf-v-08-06-12-23.pdf>. Acesso em: 25 de novembro de 2023.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 317-323, 2001.

CANCELLIER, E. L. **Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. Dissertação (Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2013.

CANTARELLA, H.; MATTOS JUNIOR, D. de; QUAGGIO, J.A.; RIGOLIN, A.T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.67, p.215-223, 2003.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 375-470, 2007

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; BRITO, S. A. G. Eficiência agrônômica do NBPT como inibidor de urease: uma revisão. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; QUAGGIO, J. A. Volatilização de amônia a partir de ureia tratada com inibidor de urease aplicada a mantas de palha de cana-de-açúcar. **Scientia agrícola**, v. 65, p. 397-401, 2008.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. O uso de inibidor de urease para aumentar a eficiência da uréia. **Simpósio sobre informações recentes para otimização da produção agrícola**, v. 1, 2007.

COSTA, H.; SILVA, R. **O setor de fertilizantes no Brasil e sua influência na produtividade agrícola**. Monografia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2012.

COSTA, A. C. S.; FERREIRA, J. C.; SEIDEL, E. P.; TORMENA, C. A.; PINTO, J. C. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em três solos argilosos tratados com ureia. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 26, n. 4, p. 467-473, 2004.

CHAGAS, P. H. M.; GOUVEIA, G. C. C.; COSTA, G. G. S.; BARBOSA, W. F. S.; ALVES, A. C. Volatilização de amônia em pastagem adubada com fontes nitrogenadas. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 76-80, 2017.

BONA, F. D.; MORI, C.; WIETHÖLTER, S. Manejo nutricional da cultura do trigo. 2016.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. 2006. Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2657/1/BS%2024%20Fertilizantes_Uma%20Vis%c3%a3o%20Global%20Sint%c3%a9tica_P.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2023.

DOMINGHETTI, A. W. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro. Tese, Universidade Federal de Lavras. , Lavras, MG, 2016. 144 p.

EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origem e perspectivas de um novo paradigma**. 2. ed. Guaíba, agropecuária, 1999. 157p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/338818>. Acesso em 15 de jun. 2023.

ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 939-946, 2001.

EVANGELISTA, B.S *et al.* **Outlook GlobalFert. 2021**. Disponível em: <https://www.globalfert.com.br/OGFposEvento/arquivo/Outlook-GlobalFert-2021.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

FAO. Food Agriculture Organization - The state of food insecurity in the World 2012. **Economic growth is necessary but not sufficient to accelerate reduction of hunger and malnutrition**. Rome. 2012.

FRANCO, J. A. M.; SARAIVA NETO, A. Produção de fertilizantes nitrogenados e suprimentos de matéria prima. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba, IPNI, 2007.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados históricos anuais - ano 2023**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2024.

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. Nitrogênio na agricultura brasileira. in: LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes, agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2009. p. 211-255.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2006.

NANES, M. B. **Influência da amônia livre na nitrificação parcial em reatores em série anaeróbio e aeróbio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2017.

NIELSEN, D. C.; HALVORSON, A. D. Influência da fertilidade do nitrogênio no estresse hídrico e na produtividade do trigo de inverno. **Revista de Agronomia**, v. 83, n. 6, pág. 1065-1070, 1991.

OUYANG, D.; MACKENZIE, A. F.; FAN, M. Fitotoxicidade da ureia bandada adicionada de superfosfato triplo e cloreto de potássio. **Revista de Agronomia**, v. 90, n. 6, pág. 734-739, 1998.

PRANDO, A. M.; ZUCARELI, C.; FRONZA, V.; OLIVEIRA, F. A.; OLIVEIRA, J. A. Características produtivas do trigo em função de fontes e doses de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.43, n.1, p.34-41, 2013.

PIRES, M. V.; CUNHA, D. A.; MATOS, C. S.; COSTA, M. H. Nitrogen-Use Efficiency, Nitrous Oxide Emissions, and Cereal Production in Brazil: Current Trends and Forecasts. **PLOS ONE**, v.10, ago. 2015.

RODRIGUES, J. O.; MONTE, J. A.; OLIOSI, G.; DIAS, M.; PARTELLI, F.; PIRES, F.; ESPINDULA, M. Perdas por Volatilização de Diferentes Adubos Nitrogenados Aplicados no Cafeeiro Conilon. 2012. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/950178/1/volatizacao.pdf>. Acesso em 19 de jul. 2023.

RODRIGUES, R. A. R.; MELLO, W. D.; CONCEIÇÃO, M. C. G.; SOUZA, P. A.; SILVA, J. J. N. Nitrogen dynamics in tropical agricultural and forest systems and their impact on climate change. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 5, p. 1868-1886, 2017.

SANZ-COBENA, A.; MISSELBROOK, T. H.; ARCE, A.; MINGOT, J. I.; DIEZ, J. A.; VALLEJO, A. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 126, n. 3-4, p. 243-249, 2008.

SILVA, J.; MAIA, D. RELAÇÃO ENTRE RENDA DO AGRONEGÓCIO E EMISSÃO DE CO₂eq NO BRASIL: Uma análise entre 1994 e 2018. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 19, n. 39, 2022.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, 2011.

TENKORANG, F.; DEBOER, J. L. Forecasting long-term global fertilizer demand. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 83, n. 3, p.233-247, out. 2008.

VIEIRA, R. F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p. Disponível em:
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1090589/1/2017LV04.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

VIERO, F. **Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas do trigo e do milho em sistema plantio direto no sul do Brasil**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VIERO, F.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; MORAES, R. P, **Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas do trigo e do milho em plantio direto, no sul do Brasil**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, 2014.

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. In: BORGES, A. L. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Cap. 14, p. 263-303.

KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; VAIO, N.; CRAIG, J. R.; REMA, J. A.; MORRIS, L. A. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 5, p. 1744-1750, 2004.