

Eficiência da adubação nitrogenada associada ao inibidor de urease no cultivo de girassol-mexicano irrigado

Efficiency of nitrogen fertilization associated with urease inhibitor in irrigated mexican sunflower cultivation

Eficiencia de la fertilización nitrogenada asociada al inhibidor de la ureasa en el cultivo de girasol mexicano con regadio

Recebido: 15/09/2021 | Revisado: 20/09/2021 | Aceito: 22/09/2021 | Publicado: 24/09/2021

Eden Eduardo Alves Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1169-4565>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: eden_agronomia@hotmail.com

Luan Mateus Silva Donato

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-2431>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: luan_mateus_sd@hotmail.com

Vitor Diniz Machado

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1730-4567>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: vdinizmachado@yahoo.com.br

Rodinei Facco Pegoraro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8692-9296>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: rodinei@ufmg.br

Rodrigo Eduardo Barros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4785-7725>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: rodrigo.edb@hotmail.com

Jatnel Alonso Lazo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8697-5981>
Instituto de Ciencia Animal: San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba
E-mail: jatnelalonso72@gmail.com

Leonardo David Tuffi Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9362-778X>
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
E-mail: ltuffi@ufmg.br

Resumo

O uso da ureia como fertilizante implica em elevadas perdas de N-NH₃. Essas perdas comprometem a sustentabilidade da adubação nitrogenada em sistemas intensivos de produção de forragem, mesmo em áreas irrigadas de regiões tropicais. Assim, é primordial a adoção de práticas de manejo que favoreçam a eficiência de utilização do N-ureia pelas plantas. Portanto, avaliou-se a aplicação de doses de ureia associada ou não ao inibidor de urease NBPT[®] sobre as perdas de N-NH₃ do solo por volatilização, a produtividade e a eficiência de uso do N na *Tithonia diversifolia* em cultivo irrigado. Utilizou-se o delineamento em bloco casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 5, sendo o primeiro fator a ureia associada ou não com o inibidor de urease NBPT[®], e o segundo representado pelas doses de 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N. As maiores perdas de N-NH₃ no solo foram observadas no 6^o dia após aplicação, nos tratamentos sem inibidor de urease e nas maiores doses de ureia. A utilização de NBPT[®] reduziu a perda de N-NH₃ no solo a menos de 5% das doses aplicadas. O NBPT[®] em mistura a ureia aumenta a eficiência agrônômica do uso do N e a produtividade pela *T. diversifolia* em comparação ao uso do fertilizante sem esse inibidor. A eficiência do uso do nutriente aplicado possui comportamento inverso ao aumento da dose de N aplicada, sendo o melhor custo benefício referente a produtividade da forrageira (12.000 kg ha⁻¹ de massa seca) obtido com a aplicação 50 kg ha⁻¹ de N com NBPT[®].

Palavras-chave: N (n butil) tiofosfóricotriamida; Eficiência agrônômica; *Tithonia diversifolia*; Ureia.

Abstract

The use of urea as a fertilizer implies high N-NH₃ losses. These losses compromise the sustainability of nitrogen fertilization in intensive forage production systems, even in irrigated areas in tropical regions. Thus, it is essential to adopt management practices that favor the efficiency of the use of N-urea by plants. Therefore, it was evaluated the

application of urea doses associated or not with the urease inhibitor NBPT® on soil NH₃-N losses by volatilization, productivity, and N use efficiency in *Tithonia diversifolia* in irrigated cultivation. A randomized block design was used, with four replications, in a 2 x 5 factorial scheme, the first factor being urea associated or not with the urease inhibitor NBPT®, and the second represented by doses of 0, 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹ of N. The greatest losses of N-NH₃ in the soil were observed on the 6th day after application, in treatments without urease inhibitor and in the highest doses of urea. The use of NBPT® reduced the loss of N-NH₃ in the soil to less than 5% of the applied doses. NBPT® mixed with urea increases the agronomic efficiency of N use and productivity by *T. diversifolia* compared to the use of fertilizer without this inhibitor. The efficiency of the use of the applied nutrient has an inverse behavior to the increase of the applied N dose, being the best cost-benefit referring to the forage productivity (12,000 kg ha⁻¹ of dry mass) obtained with the application of 50 kg ha⁻¹ of N with NBPT®.

Keywords: N (n-butyl) thiophosphoricotriamide; Agronomic efficiency; *Tithonia diversifolia*; Urea.

Resumen

El uso de urea como fertilizante implica elevadas pérdidas de N-NH₃. Estas pérdidas comprometen la sostenibilidad de la fertilización nitrogenada en sistemas intensivos de producción de forrajes, incluso en áreas irrigadas en regiones tropicales. Por ello, es fundamental adoptar prácticas de manejo que favorezcan la eficiencia del uso de N-urea por parte de las plantas. Por lo tanto, se evaluó la aplicación de dosis de urea asociadas o no al inhibidor de ureasa NBPT® sobre pérdidas de NH₃-N del suelo por volatilización, productividad y eficiencia de uso de N en *Tithonia diversifolia* en cultivada con riego. Se utilizó un diseño de bloques al azar, con cuatro repeticiones, en un esquema factorial 2 x 5, siendo el primer factor la urea asociada o no al inhibidor de ureasa NBPT®, y el segundo representado por las dosis 0, 50, 100, 150 y 200 kg ha⁻¹ de N. Las mayores pérdidas de N-NH₃ en el suelo se observaron al sexto día después de la aplicación, en los tratamientos sin inhibidor de ureasa y en las dosis más altas de urea. El uso de NBPT® redujo la pérdida de N-NH₃ en el suelo a menos del 5% de las dosis aplicadas. NBPT® mezclado con urea aumenta la eficiencia agronómica del uso de N y la productividad de *Tithonia diversifolia* en comparación con el uso de fertilizantes sin este inhibidor. La eficiencia del uso del nutriente aplicado tiene un comportamiento inverso al aumento de la dosis de N aplicada, siendo el mejor costo beneficio referido a la productividad del forraje (12.000 kg ha⁻¹ de masa seca) obtenida con la aplicación de 50 kg ha⁻¹ de N con NBPT®.

Palabras clave: N (n butil) tiofosforiocotriamida; Eficiencia agronómica; *Tithonia diversifolia*; Urea.

1. Introdução

A *Tithonia diversifolia* é uma planta arbustiva encontrada em regiões tropicais e subtropicais (Santos Silva et al., 2021) que apresenta elevado potencial forrageiro em virtude da alta produtividade e valor nutricional (Reis et al., 2016; Santos Silva et al., 2021). Na região tropical da América Central e do Sul a espécie tem sido usada como forrageira de corte (Mejía-Díaz et al. 2017, Gallego-Castro et al. 2017, Ruiz et al. 2018), com boa resposta produtiva aos sistemas intensivos de produção irrigada e com fertilização nitrogenada (Santos Silva et al., 2021). A adubação nitrogenada pode aumentar a produtividade da *T. diversifolia*, entretanto, o aumento da produtividade e eficiência de utilização do N pelas plantas são dependentes da adoção de práticas de manejo, fonte e doses adequadas de N, entre outras. Essas informações para sistemas irrigados com produção intensiva de *T. diversifolia* são escassas na literatura.

Entre as fontes disponíveis de adubos nitrogenados a ureia é a mais utilizada devido à alta concentração de N (45% de N) e menor custo (Silva et al., 2017). A ureia, ao ser aplicada na superfície do solo, está sujeito a perdas por volatilização (N-NH₃) que podem atingir até 70% do nitrogênio (N) aplicado (Scivittaro et al., 2010; Adfert, 2013; Santos et al., 2016), configurando-se como sério problema econômico e ambiental.

Essas perdas ocorrem principalmente pela alta atividade da enzima urease e está relacionada diretamente ao tipo de solo, suas características químicas e físicas, como, pH; capacidade de trocas cátions (CTC); a textura e teor de matéria orgânica (MOS) (Novais, 2007). A resposta produtiva de forrageiras é positiva quanto ao aumento das doses de ureia (Theodoro et al., 2021, Moura et al., 2021; Ramadhan; Muhsin, 2021). Entretanto são escassos os trabalhos que quantificam as perdas desse nutriente de forma a estimar a eficiência da fertilização com ureia na produção de forragem nos trópicos.

Algumas práticas culturais podem minimizar as perdas por volatilização do N, entre elas a incorporação do fertilizante e parcelamento da adubação, bem como a utilização de inibidores da urease (Chagas et al., 2017). O inibidor N-(n-butil) Tiofosfóricotriamida (NBPT®) possui capacidade de reduzir a hidrólise da ureia por meio da inibição da atividade da urease

resultando em menores perdas por volatilização da amônia (Tasca et al., 2011; Cantarella et al., 2018). O efeito do uso do NBPT® é mais expressivo na primeira semana após sua aplicação, pois a ureia se hidrolisa rapidamente, tornando-se suscetível às maiores perdas de N-NH₃ (Silva et al., 2017).

O NBPT® associado à ureia pode ser utilizado como alternativa na diminuição das elevadas perdas de nitrogênio em sistemas de produção de forragem nos trópicos. A diminuição da perda de N-NH₃ propicia maior disponibilidade de N para as plantas (Mikkelsen, 2009; Dawar et al., 2021), contribuindo para sua maior produtividade. Nossa hipótese é que o uso do inibidor de urease possibilitaria maior resposta produtiva da *T. diversifolia* irrigada de forma a aumentar a eficiência do uso do nitrogênio. Neste contexto objetivou-se avaliar a aplicação de doses de ureia associada ou não ao inibidor de urease NBPT® sobre as perdas de N-NH₃ do solo por volatilização, a produtividade e a eficiência de uso do N na *Tithonia diversifolia* em cultivo irrigado.

2. Metodologia

O trabalho foi desenvolvido em área irrigada localizada na longitude 43° 50' 18.29" O e latitude 16° 40' 59.29" S, pertencente à Fazenda Experimental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros – MG. O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo AW – Tropical com inverno seco (Alvares et al., 2013). Sendo o experimento realizado de maio a agosto de 2017 nas estações outono e inverno. O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háptico eutrófico textura argilo-siltosa (EMBRAPA, 2013).

O experimento foi conduzido em área já cultivada com *Tithonia diversifolia* com três anos de implantação e submetida a cortes frequentes para uso como forrageira picada e fornecida *in natura* aos animais. Para início do experimento procedeu-se uma roçada das plantas a 30 cm de altura, com auxílio de roçadeira mecanizada, para uniformização das brotações. O solo da área foi amostrado para caracterização dos aspectos físicos e químicos: pH em água, 7,67; matéria orgânica, 3,66 dag kg⁻¹; P, 1,88 mg dm⁻³; K, 137,67 mg dm⁻³; Ca, 7,07 cmol_c dm⁻³; Mg, 1,60 cmol_c dm⁻³; Al, 0,0 cmol_c dm⁻³; H+Al, 1,05 cmol_c dm⁻³; CTC, 10,06 cmol_c dm⁻³; saturação por bases, 89,67%; areia, 19,47%; silte, 38,80%; argila, 41,73%.

Após o corte de uniformização aplicou-se em cobertura 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, com as fontes cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente. A área foi irrigada por sistema de aspersão convencional, buscando manter o solo próximo a 80% de sua capacidade de campo. Para tanto foram aplicados em média 42 mm por semana de lâmina de irrigação, em turno de rega fixo de dois dias.

Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 5, sendo duas formas de adubação nitrogenada com ureia (ureia comum e ureia + inibidor de urease – NBPT) e cinco doses de nitrogênio, equivalentes à 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹. As parcelas foram constituídas por três linhas de plantas de *T. diversifolia* com 3,6 m de comprimento e cultivadas no espaçamento de 1,0 m entre linha e 0,4 m entre plantas na linha. A linha de plantas central das parcelas foi considerada a área útil para mensurações.

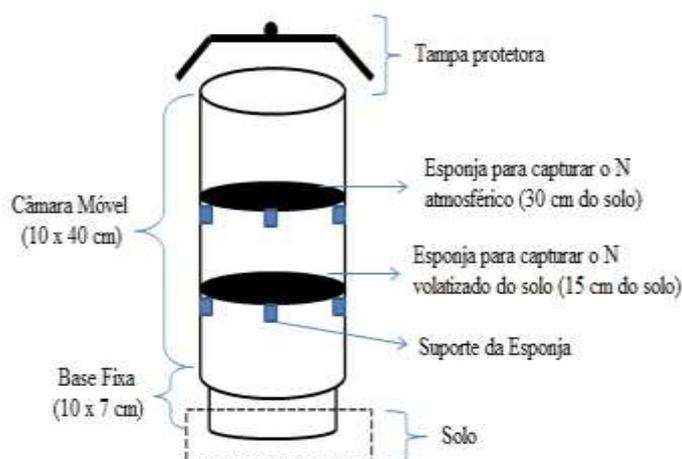
A ureia foi aplicada na superfície do solo a 25 cm de distância das plantas entre linhas de cultivo, aos 20 dias após o corte de uniformização da *T. diversifolia*. Nos tratamentos correspondentes o produto comercial UREMAX NBPT® foi adicionado manualmente à ureia, na dose de 6,5 g do produto para 1.000 g de N (Adfert, 2013).

A volatilização de amônia do solo foi avaliada com câmaras estáticas e semi-abertas (Figura 1), de acordo com Cantarella et al. (2003). Para tanto, foram alocadas nas entre-linhas das plantas seis bases fixas de PVC com 10 cm de diâmetro por 7,0 cm de altura, sendo enterrada em 3 cm da superfície do solo. Nessas bases fixas foram realizadas as adubações com ureia, espalhadas em 100% da superfície do solo, de modo proporcional à área da base e doses recomendadas de 0; 1,9; 2,3; 3,5; 4,6 g de ureia/base de PVC, de acordo com os tratamentos. Em seguida, foram alocadas sobre a base

câmaras móveis de PVC com 10 cm de diâmetro e 40 cm de altura, cobertas na parte superior com tampa plástica protetora, com espaço de 1 cm para passagem de ar.

No interior das câmaras móveis de PVC foram acondicionados dois discos de espuma de polietileno com 2 cm de espessura, embebidos em 100 mL de solução preparada com 50 mL L⁻¹ de H₃PO₄ e 40 mL L⁻¹ de glicerina. Os discos de espuma foram levemente comprimidos para atingirem volume final de solução de 70 mL, evitando o gotejamento no interior dos cilindros. O primeiro disco de espuma foi alocado na câmara a 15 cm de altura do solo, com o intuito de capturar o N-NH₃ volatilizado do solo que é de interesse da pesquisa, e o segundo disco de espuma foi alocado na câmara, a 30 cm de altura do solo, com a função de captar a N-NH₃ proveniente da atmosfera e garantir que o mesmo não venha interferir na captura do N-NH₃ volatilizado do solo.

Figura 1. Imagem ilustrativa da câmara coletora de N-NH₃ volatilizado do solo.



Fonte: Autores (2021).

Em cada parcela experimental foi instalada seis bases fixas e uma câmara móvel, a qual foi movimentada e acoplada nas bases a cada três dias, sendo a câmara usada para determinar a perda de N por volatilização da amônia (N-NH₃).

As perdas de amônia foram avaliadas aos 3, 6, 9, 12, 15 e 18 dias após aplicação da adubação no solo. Após cada coleta, o fosfato de amônio captado foi extraído imediatamente dos discos de espuma por meio de oito lavagens sucessivas com solução contendo 1 mol L⁻¹ de KCl. O produto dessa lavagem foi coletado em balões volumétricos e o volume ajustado para 500 mL com solução KCl (1 mol L⁻¹). Dessa solução retirou-se 20 mL de alíquota para determinação do teor de N-NH₃ por meio de destilador de arraste de vapor semimicro Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). A determinação do nitrogênio amoniacal foi estimada com base no volume de ácido sulfúrico (H₂SO₄) gasto na titulação das provas em branco e das amostras, de acordo com a equação (Tedesco et al., 1995):

$$N-NH_3 = [(Vac - Vbr) \times 14,007 \times Nac / Val] \times Vt$$

onde:

N-NH₃ = Nitrogênio amoniacal

Vac = volume de ácido sulfúrico gasto na titulação da amostra (mL);

Vbr = volume de ácido sulfúrico gasto na titulação do branco de análise (mL);

Nac = normalidade do ácido sulfúrico utilizado;

Val = volume da alíquota utilizada na destilação (mL);

V_t = volume total de extrato (mL).

Aos 74 dias após o corte de uniformização foi realizado a colheita de duas plantas centrais da parcela (cortando-se a 30 cm de altura do solo). Imediatamente após a colheita, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados e perfurados para serem levados a estufa de circulação forçada de ar a 55 °C, até atingirem peso constante. Sendo posteriormente pesada em balança de precisão para determinação da massa seca para posterior determinação da produtividade.

Também foi analisada a eficiência agronômica da utilização do N pela *T. diversifolia*, segundo a metodologia determinada por Fageria & Baligar (2005), sendo $EA = (PMS_{cf} - PMS_{sf}) / (QNa)$, expressa em $kg\ kg^{-1}$

onde:

EA = eficiência agronômica;

PMS_{cf} = produção de massa seca no tratamento com adubação nitrogenada;

PMS_{sf} = produção de massa seca no tratamento sem adubação nitrogenada (testemunha);

QNa = quantidade em kg de N aplicado.

De acordo com a equação adaptada e ajustada determinou-se de forma similar a eficiência do inibidor NBPT[®],

$EI = (PMS_{cNBPT}^{\circledast} - PMS_{sNBPT}^{\circledast}) / (QNBPT^{\circledast}_a)$, expressa em $kg\ kg^{-1}$

onde:

EI = eficiência do inibidor;

$PMS_{cNBPT}^{\circledast}$ = produção de massa seca com NBPT[®];

$PMS_{sNBPT}^{\circledast}$ = produção de massa seca sem NBPT[®];

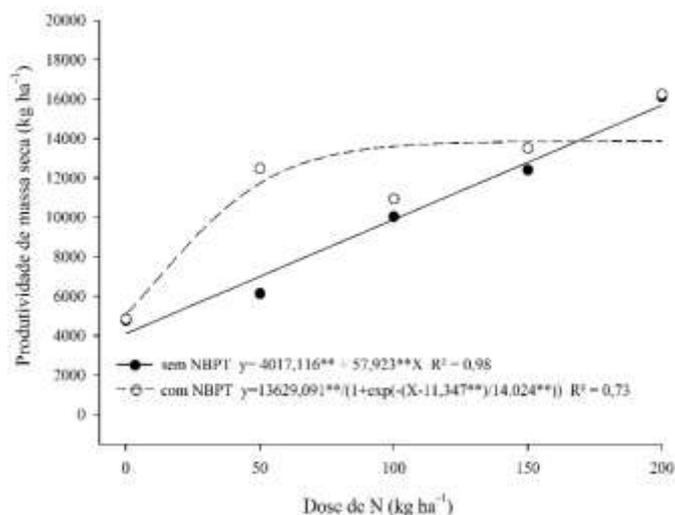
$QNBPT^{\circledast}_a$ = quantidade em kg de NBPT[®] aplicado.

Esse estudo consiste de pesquisa experimental com avaliação de dados quantitativos (Pereira et al., 2018). A perda de nitrogênio na forma de volatilização do N-NH₃, a eficiência agronômica do N aplicado e a eficiência do inibidor NPBT[®] foram apresentadas de forma descritiva, já a produtividade de massa seca foi submetida à análise de variância pelo teste F a 5% de probabilidade e em casos de significância, foi realizada a análise de regressão em função das doses de nitrogênio, por meio do programa estatístico RStudio (R Core Team 2021).

3. Resultados e Discussão

A adubação com ureia em diferentes doses de N sem inibidor NBPT[®] proporcionou aumento linear na produtividade da *T. diversifolia*, enquanto que na presença do inibidor NBPT[®] esse ajuste foi sigmoidal (Figura 2).

Figura 2. Produtividade de massa seca (kg ha^{-1}) após aplicação de doses de nitrogênio no cultivo irrigado de *Tithonia diversifolia*, utilizando fertilizante ureia com e sem inibidor NBPT®



**Significativo a $p < 0,05$ pelo teste t

Fonte: Autores (2021).

A produtividade inicial das plantas que não receberam adubação nitrogenada (com ou sem NBPT®) correspondeu a 4.017 kg ha^{-1} de massa seca (Figura 2), enquanto que a aplicação de 200 kg ha^{-1} de N, sem NBPT® garantiu a produtividade máxima de $16.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de massa seca de *T. diversifolia*, após 74 dias de cultivo (Figura 2). Com isso, a aplicação de ureia propiciou o aumento médio de $57,92 \text{ kg}$ de massa seca para cada Kg de N adicionado ao solo, demonstrando o elevado potencial de produção de forragem e resposta à adubação nitrogenada.

A presença do NBPT® na adubação nitrogenada modificou a resposta da planta em produtividade (Figura 2), obtendo-se maiores respostas positivas com menores doses de N, em comparação aos tratamentos sem NBPT®. Com isso, após a aplicação de 50 kg ha^{-1} de N (com NBPT®) obteve-se a produtividade de $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ de massa seca, considerada 100% superior àquela observada no tratamento sem inibidor. Além disso, com NBPT® na adubação nitrogenada, o incremento na produtividade ocorreu somente até a dose 130 kg ha^{-1} . Esse resultado indica melhor aproveitamento da cultura em relação à disponibilidade de nitrogênio e a menor perda de N-NH_3 por volatilização quando do uso do NBPT®.

O uso do NBPT® misturado à ureia promoveu maior eficiência agrônômica do uso do N, quando comparado ao uso isolado desse fertilizante, independentemente da dose aplicada (Tabela 1). A aplicação de 50 kg ha^{-1} de N com NBPT® proporcionou a maior eficácia agrônômica do uso desse fertilizante e a maior resposta produtiva por valor investido na fertilização (Tabela 1). Nesse manejo de adubação, a eficiência agrônômica e o custo parcial com a adubação corresponderam a $176,16 \text{ kg kg}^{-1}$ e $124,14 \text{ kg}$ de MS/R\$ investido, respectivamente, enquanto que na ausência do inibidor esses resultados corresponderam a $27,24 \text{ kg kg}^{-1}$ e $62,79 \text{ kg}$ de MS/R\$ investido, respectivamente.

Tabela 1. Eficiência Agronômica do N aplicado e custo econômico durante o ciclo completo da *Tithonia diversifolia* após aplicação de doses de nitrogênio na forma de ureia com e sem NBPT® no cultivo irrigado.

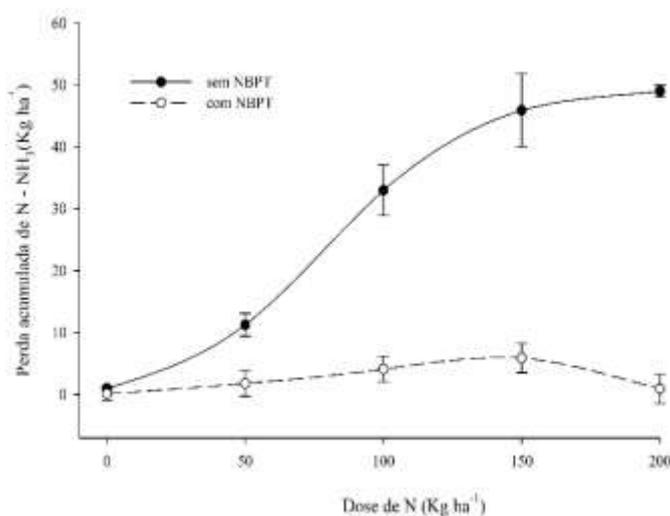
Dose de N	Eficiência Agronômica do N aplicado (kg kg⁻¹)	Custo com Adubação (R\$)	*Custo Parcial (kg de MS/R\$ investido)
50 sem NBPT	27,24	97,77	62,79
50 com NBPT	176,16	104,59	124,14
100 sem NBPT	52,70	195,55	51,37
100 com NBPT	67,69	209,20	52,32
150 sem NBPT	50,90	293,00	42,36
150 com NBPT	62,27	313,80	43,07
200 sem NBPT	57,32	391,11	41,23
200 com NBPT	60,32	418,41	38,81

*Custo parcial de quilo de massa seca por real investido em ureia. Fonte: Autores (2021).

A aplicação de ureia com NBPT também aumentou, respectivamente em 22 e 27% a produtividade e a assimilação do N pelo trigo cultivado em solos alcalinos do Paquistão, em comparação ao uso isolado de ureia, contribuindo para mitigar a emissão N-NH₃ e N-N₂O e, aumentar a eficiência de utilização do N pela cultura (Dawar et al., 2021). Fageira et al. (2003) relatam que a eficiência agronômica pode ser aumentada quando se faz uso de dose adequada e aplicações na época apropriada, de acordo com a necessidade da cultura. A aplicação de maiores doses de N está associada a menor eficiência agronômica do uso desse nutriente, dada a disponibilidade maior do que a demanda pelas culturas (Fernandes et al., 2005). Adicionalmente, altas doses de N na forma de ureia podem ocasionar elevadas perdas por volatilização do N-NH₃, promovendo decréscimo na eficiência agronômica (Farinelli & Lemos, 2011).

O aumento das doses de N sem inibidor incrementou a volatilização de N-NH₃ após a adubação (Figura 3), apresentando médias superiores àquelas obtidas nos tratamentos que receberam NBPT®.

Figura 3. Perdas acumulada de N-NH₃ no solo durante 18 dias após aplicação de doses de nitrogênio no cultivo irrigado de *Tithonia diversifolia*, utilizando fertilizante ureia com e sem inibidor NBPT®. As barras verticais indicam o erro padrão da média.



Fonte: Autores (2021).

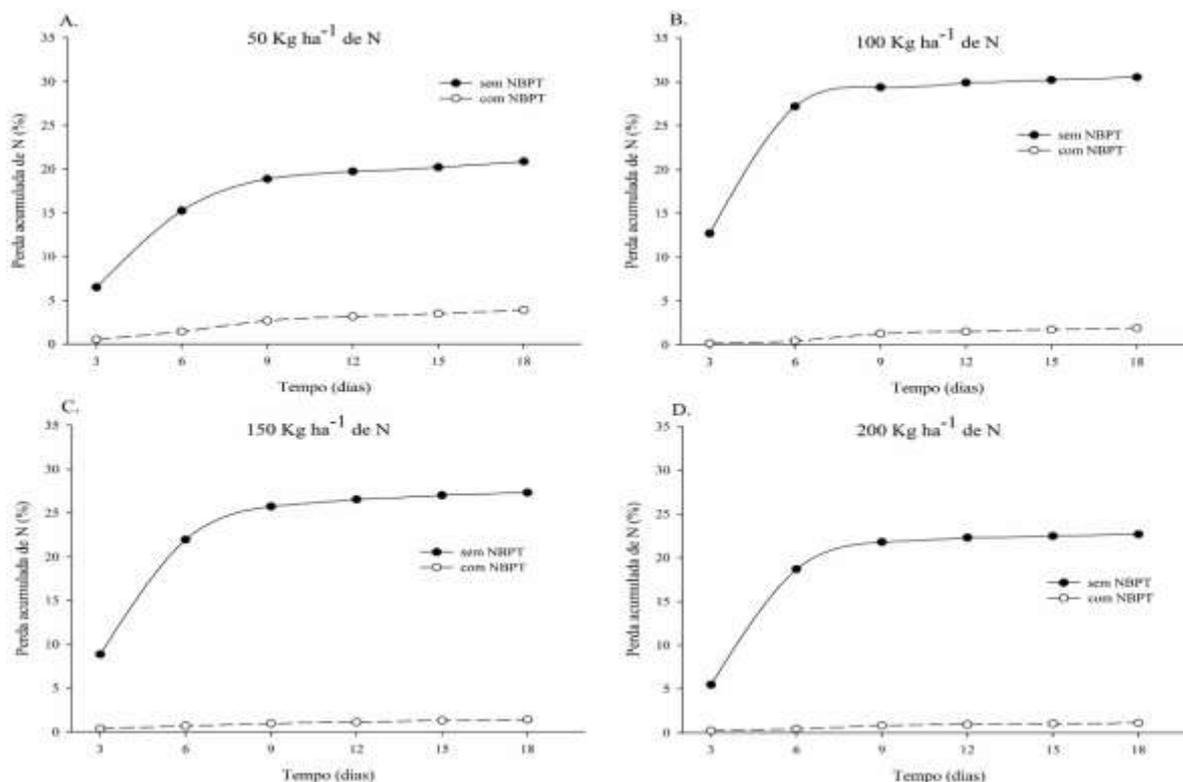
Após a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N observou-se a perda acumulada de 49 kg ha⁻¹ de N-NH₃ no tratamento sem NBPT® (Figura 3). A adubação com ureia apresenta alguns aspectos indesejáveis, como reação inicial alcalina no solo que associado a aplicação localizada de maiores doses resultam em maior perda de N-NH₃ (Scivittaro et al., 2010).

As menores perdas de N-NH₃ observadas nas adubações com NBPT® foram atribuídas ao efeito inibitório na atividade enzimática catalizadora das reações que envolvem a mineralização da ureia no solo, reduzindo e retardando as perdas de N-NH₃, principalmente na primeira semana após a aplicação de ureia (Silva et al., 2017). O NBPT tem a função de inibir a ação da enzima urease responsável por desencadear o processo de mineralização da ureia (Silva et al., 2017), deixando disponível por maior tempo o nitrogênio para as plantas. O NBPT é capaz de bloquear rapidamente três sítios ativos da enzima urease, devido a formação de ligações de natureza tridentada, em dois átomos de níquel e um átomo de oxigênio do grupo carbamato da enzima urease, reduzindo a probabilidade da ureia ligar-se ao átomo de níquel (Manunza et al., 1999; Cantarella et al., 2018).

Outro fator que poderia reduzir a perda de N-NH₃ após a adubação com ureia seria o uso da água de irrigação, por promover maior incorporação da molécula de ureia nos colóides do solo. Esse processo aumenta o tempo para a difusão do fertilizante em maiores volumes de solo, diminuindo as perdas de N-NH₃ (Cantarella, 2008). Entretanto, observou-se nesse estudo que a volatilização de N-NH₃ foi elevada, nos tratamentos que receberam maiores doses de ureia, o que ressalta a preocupação com as perdas em sistemas intensivos de produção de forragem, mesmo na presença de irrigação.

As perdas de N-NH₃ acumuladas em porcentagem durante os 18 dias de avaliação, variaram com as diferentes combinações nitrogenadas e doses de N (Figura 4 A, B, C e D).

Figura 4. Perda acumulada de N-NH₃ no solo, em porcentagem, durante 18 dias após aplicação de doses de nitrogênio na forma de ureia com e sem NBPT® no cultivo irrigado de *Tithonia diversifolia*.



Fonte: Autores (2021).

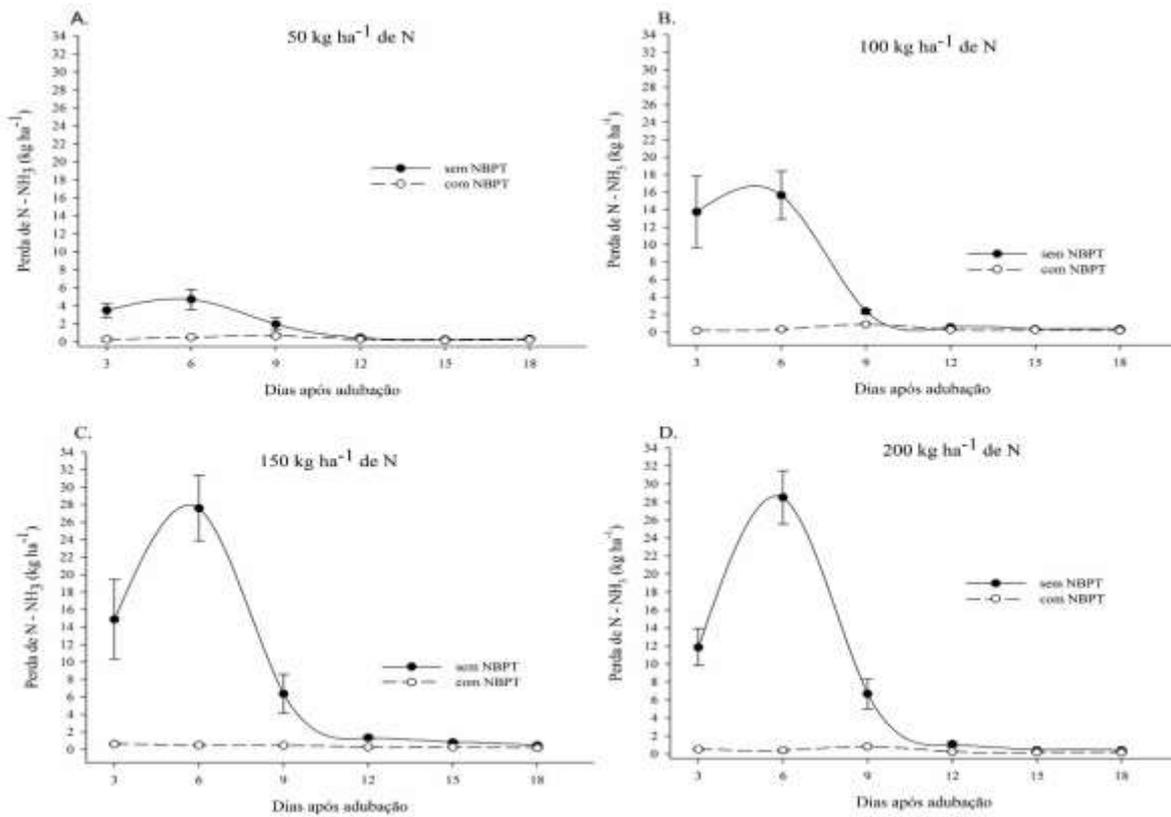
A aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N no tratamento sem NBPT® propiciou as maiores perdas relativas de N-NH₃, com volatilização de 33% do N aplicado (Figura 4B). Na dose de 200 kg ha⁻¹ de N sem NBPT® a perda relativa de N-NH₃ correspondeu a 24,5% (Figura 4D). A redução na perda relativa de N-NH₃ para a maior dose aplicada pode ser atribuída a maior saturação dos sítios de ação da enzima urease dada a maior disponibilidade de ureia no solo, conforme observado por Silva et al. (2017). No entanto, na presença de NBPT® a saturação dos sítios de ação da enzima foi menor ou inexistente, retardando o efeito do aumento das doses de N nas perdas por volatilização (Figura 5A, B, C e D). O uso do NBPT® impediu que ocorresse alta concentração de N na forma amoniacal NH₄⁺ e a elevação excessiva do pH, localizado no entorno da granula de ureia, reduzindo a perda de N-NH₃ (Stafanato et al., 2013).

No presente estudo, as maiores taxas de perda de N-NH₃ foram observadas no sexto dia e, as menores taxas, a partir do nono dia após a aplicação da ureia (Figura 5 A, B, C e D).

Em cultivos de arroz irrigado, Scivittaro et al. (2010) descreveram pico de volatilização do N-NH₃ no quinto dia e, decréscimo na perda de N, no décimo dia após aplicação de ureia, indicando a elevada velocidade da hidrólise da ureia em solos de regiões tropicais (Cantarella et al., 2008; Silva et al., 2017). No cultivo de *T. diversifolia*, com apenas seis dias após a aplicação de 150 e 200 kg ha⁻¹ de N, sem NBPT® observou-se perda de 28 e 29 kg de N-NH₃ (Figura 5C e D).

A taxa de hidrólise da ureia pela enzima urease é mais expressiva durante os primeiros dias após adubação (Scivittaro et al., 2010; Silva et al., 2017; Dawar et al., 2021). Alguns trabalhos têm relatado perdas de N-NH₃ de até 70% do N aplicado, com uma média entre 20 a 30%, em condições experimentais (Cantarella et al., 2008; Scivittaro et al., 2010).

Figura 5. Perdas de N-NH₃, em função dos dias após aplicação de doses de nitrogênio no cultivo irrigado de *Tithonia diversifolia*, utilizando fertilizante ureia com e sem inibidor NBPT®. As barras verticais indicam o erro padrão da média.



Fonte: Autores (2021).

Na presença do inibidor de urease as perdas de N-NH₃ foram menores e ocorreram em período posterior ao nono dia após a aplicação da ureia em todas as doses testadas (Figura 5A, B, C e D). Esses resultados corroboram com Okumura & Cinque (2012) que observaram que o NBPT® é capaz de inibir por até 14 dias a degradação enzimática da ureia, proporcionando menor perda de N-NH₃. Diante disso, foi possível observar nesse trabalho que o período crítico de perda de N-NH₃ ocorreu até o 9º dia após adubação nitrogenada, na ocasião em que o uso desse inibidor demonstrou-se eficiente.

As elevadas temperaturas durante o período experimental contribuíram para obtenção de intenso processo de perda de N-NH₃ no período inicial de cultivo da *T. diversifolia*, com temperatura máxima próxima a 35 °C e radiação elevada. Silva et al. (2017) trabalhando com a cultura do abacaxi em área irrigada com presença de altas temperaturas e radiação também observaram elevadas perdas de N-NH₃ quando da fertilização com ureia.

A elevada temperatura local associada a condições de intensa radiação solar também contribuiu para o aumento da perda de água por evaporação. As taxas de evaporação associadas com a umidade do solo, são parâmetros que ajudam a determinar o momento adequado de aplicação dos fertilizantes nitrogenados sem incorporação. No entanto o solo com baixa umidade favorece as perdas de N-NH₃ devido às elevadas concentrações de NH₄⁺ e NH₃ em solução, favorecendo a emissão da forma gasosa de NH₃ (Silva et al., 2017).

Em regiões tropicais, solos com reação alcalina podem desenvolver micro-sítios com elevada alcalinidade no entorno de partículas de solo (pH 8-9,0), favorecendo a volatilização de N-NH₃ (Novais, 2007). Essas condições podem ser observadas em solos de influência de rochas de origem calcária, com pH superior a 7,0, associado a elevado teor de matéria orgânica, fatores que favorecem a atividade da enzima urease e a transformação da ureia em N-NH₃.

4. Conclusão

A fertilização com nitrogênio em cobertura com uso de ureia em área irrigada de cultivo de *T. diversifolia* provoca perdas por volatilização de cerca de 30% do N aplicado. Com aplicação do inibidor de urease NBPT® em mistura com a ureia as perdas de N por volatilização são inferiores a 5% das doses aplicadas.

O uso do NBPT® em mistura com a ureia aumenta a eficiência do uso do N pela *T. diversifolia* em comparação ao uso do fertilizante sem esse inibidor de urease. Melhor custo benefício para produtividade da *T. diversifolia* foi obtido com a aplicação do N na dose de 50 kg ha⁻¹ de N com uso do inibidor de urease NBPT®.

Por fim sugerimos futuras investigações abordando o efeito do inibidor da uréase NBPT® em sistemas de sequeiro e em consonâncias com outras práticas de manejo do solo de forma aprofundar no conhecimento da sustentabilidade do uso da adubação nitrogenada na produção de forragem e de outras culturas de interesse.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento de parte dos estudos e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida ao quarto e último autor.

Referências

- ADFERT (2013). *Aditivos Agrícolas. UREMAX NBPT*. <http://www.adfert.com.br/produtos/uremax-nbpt/>.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M. & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (6), 711-728.
- Cantarella, H., Mattos junior, D., Quaggio, J. A. & Rigolin, A. T. (2003). Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 67, 215-223.
- Cantarella, H., Trivelin, P. C. O., Contin, T. L. M., Dias, F. L. F., Rossetto, R., Marcelino, R., Coimbra, R. B. & Quaggio, J. A. (2008). Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Scientia Agricola*, 65 (4), 397-401.
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R. & de Brito Silva, A. G. (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of advanced research*, 13, 19-27.
- Chagas, P. H. M., Gouveia, G. C. C., Costa, G. G. S., Barbosa, W. F. S. & Alves, A. C. (2017). Volatilização de amônia em pastagem adubada com fontes nitrogenadas. *Revista de Agricultura Neotropical*, 4 (2), 76-80.
- Dawar, K., Fahad, S., Jahangir, M. M. R., Munir, I., Alam, S. S., Khan, S. A. & Danish, S. (2021). Biochar and urease inhibitor mitigate NH₃ and N₂O emissions and improve wheat yield in a urea fertilized alkaline soil. *Scientific Reports*, 11(1), 1-11.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Embrapa Solos, 353p.
- Fernandes, F. C. S., Buzetti, S., Arf, O. & Andrade, J. A. C. (2005). Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 4 (2), 195-204.
- Fageria, N. K. & Baligar, V. C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185.
- Fageria, N. K., Stone, L. F. & Santos, A. B. dos. (2003). *Manejo da fertilidade do solo para o arroz irrigado*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 250 p.
- Farinelli, R. & Lemos, L. B. (2011). Produtividade e eficiência agrônômica do milho em função da adubação nitrogenada e manejos de solo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 9 (2), 135-146.
- Gallego-Castro L. A., Mahecha-Ledesma L. & Angulo-Arizala J (2017) Calidad nutricional de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray bajo tres sistemas de siembra en el tropico alto. *Agronomía Mesoamericana*, 28 (1), 213-222.
- Manunza, B., Deiana, S., Pintore, M. & Gessa, C. (1999). The binding mechanism of urea, hydroxamic acid and N-(N-butyl)-phosphoric triamide to the urease active site. A comparative molecular dynamics study. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(5), 789-796.
- Mejía D. E., Mahecha L. L. & Ângulo, A. J (2017). *Tithonia diversifolia*: specie for grazing in silvopastoral systems and methods for estimating consumption. *Agronomía Mesoamericana*, 28 (1), 289-302.
- Mikkelsen, R. (2009). *Ammonia emissions from agricultural operations: fertilizer*. Better Crops, 93 (4), 9-11.

- Moura, E. D., Pötter, L., Lobato, J. F. P., Rocha, M. G., Sichonany, M. G. O., Salvador, P. R., Bergoli, T. L., Eloy, L. R., Martini, A. C. (2021). Consumo de forragem por novilhas em capim alexander (*Urochloa plantaginea* (Link.) Hitch) fertilizado com diferentes níveis de nitrogênio. *Research, Society and Development*, 10 (11), 1-10.
- Novais, R. F. (2007). *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.769-850.
- Okumura, R. S., Cinque, M. D. (2012). Aspectos agronômicos da ureia tratada com inibidor de urease. *Ambiência*, 8 (2), 403-414.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM, 119p.
- Ramadhan, M. & Muhsin, S. (2021). Evaluation of the response of sorghum to tillage systems and nitrogen fertilization. *International Journal of Agronomy*, p.1-12.
- Reis, M. M., Santos L. D. T., Pegoraro, R. F., Colen, F., Rocha, L. M. & Ferreira, G. A. D. P. (2016). Nutrition of *Tithonia diversifolia* and attributes of the soil fertilized with biofertilizer in irrigated system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20 (11), 1008-1013.
- R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Ruiz T. E., Alonso J., Torres V., Valenciaga N., Galindo J., La O. O., Febles G., Díaz H., Tuero R. & Mora C. (2018). Evaluación de materiales recolectados de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) Gra en la zona de Las Tunas y Granma en el oriente de Cuba. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 22 (1), 19-27.
- Santos, S. M. C., Antonangelo, J. A., Deus, A. C. F. & Fernandes, D. M. (2016). Perdas de amônia por volatilização em resposta a adubação nitrogenada do feijoeiro. *Revista de Agricultura Neotropical*, 3 (1), 16-20.
- Santos Silva, A. M., Santos, M. V., da Silva, L. D., dos Santos, J. B., Ferreira, E. A. & Santos, L. D. T. (2021). Effects of irrigation and nitrogen fertilization rates on yield, agronomic efficiency and morphophysiology in *Tithonia diversifolia*. *Agricultural Water Management*, 248, 106782.
- Scivittaro, W. B., Gonçalves, D. R. N., Vale, M. L. C. & Ricordi, V. G. (2010). Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. *Ciência Rural*, 40(6), 1283-1289.
- Silva, F. D., Pegoraro, R. F., Martins, V. M., Kondo, M. K., Dorasio, S., Oliveira, G. L. & Mota, M. F. C. (2017). Volatilização de amônia do solo após doses de ureia com inibidores de urease e de nitrificação na cultura do abacaxi. *Revista Ceres*, 64 (3), 327-335.
- Stafanato, J. B., Goulart, R. S., Zonta, E., Lima, E., Mazur, N., Pereira, C. G. & Souza, H. N. (2013). Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37 (3), 726-732.
- Tasca, F. A., Ernani, P. R., Rogeri, D. A., Gatiboni, L. C. & Cassol, P. C. (2011). Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35 (2), 493-502.
- Tedesco, J. M., Gionello, C., Bissani, C. A., Bohnem, H. & Volkweiss, S. J. (1995). *Análise de solos, plantas e outros materiais*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174p.
- Theodoro, G. F., Ribeiro, M. M., Pacheco, F. B. S., & Miyake, A. W. A. (2021). Rendimento de sorgo forrageiro em função de doses de nitrogênio e manejo de corte. *Research, Society and Development*, 10 (11), 1-12.