



**OPÇÕES DE FONTES DE NITROGÊNIO  
PARA A AGRICULTURA BRASILEIRA**  
**OPTIONS OF SOURCES OF NITROGEN  
FOR BRAZILIAN AGRICULTURE**



Heitor **CANTARELLA**

Medição de perdas de  $\text{NH}_3$  em estudos de campo  
*Ammonia volatilization chambers used in the field*

Instituto Agrônômico (IAC)  
Campinas (SP)



**Governo do Estado de São Paulo**  
**Secretaria de Agricultura e Abastecimento**  
**Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios**  
**Instituto Agronômico**

**Governador do Estado de São Paulo**  
Tarcísio de Freitas

**Secretário de Agricultura e Abastecimento**  
Antonio Julio Junqueira de Queiroz

**Secretário-executivo de Agricultura e Abastecimento**  
Marcos Renato Böttcher

**Subsecretário de Agricultura**  
Orlando Melo de Castro

**Coordenador da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios**  
Sergio Luiz dos Santos Tutui

**Diretor Técnico de Departamento do Instituto Agronômico**  
Marcos Guimarães de Andrade Landell

ISSN 1809-7693

**OPÇÕES DE FONTES DE NITROGÊNIO  
PARA A AGRICULTURA BRASILEIRA**

*OPTIONS OF SOURCES OF NITROGEN  
FOR BRAZILIAN AGRICULTURE*

Heitor CANTARELLA

Ficha elaborada pelo Núcleo de Informação Científica do Instituto Agronômico

C229o Cantarella, Heitor  
Opções de fontes de nitrogênio para a agricultura brasileira =  
options of sources of nitrogen for brazilian agriculture  
/ Heitor Cantarella. Campinas: Instituto Agronômico, 2023. 30p.  
(Documentos IAC, 120) - versão on-line.

Versão português / inglês  
ISSN 1809-7693

1. Fontes nitrogênio. I. Título. II. Série.

CDD: 631.522

**O Conteúdo do Texto é de Inteira Responsabilidade dos Autores.**

**Comitê Editorial do Instituto Agronômico**

Lúcia Helena Signori Melo de Castro

Fernando Alves de Azevedo

Fernando César Bachiega Zambrosi

Gabriel Constantino Blain

Valéria Aparecida Modolo

**Equipe participante desta publicação**

Coordenação da Editoração: Silvana Aparecida Barbosa

Editoração Eletrônica e Capa: Cíntia Rafaela Amaro - Amaro Comunicação

Fone: (19) 99142-8371

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação do Copyright © (Lei nº 9.610).

**Instituto Agronômico**

Caixa Postal 28

13012-970 Campinas (SP) - Brasil

[www.iac.sp.gov.br](http://www.iac.sp.gov.br)

# SUMÁRIO *SUMMARY*

	Página <i>Page</i>
RESUMO <i>ABSTRACT</i> .....	1
1. INTRODUÇÃO <i>INTRODUCTION</i> .....	2
2. O MERCADO DE FERTILIZANTES <i>THE FERTILIZER MARKET</i> .....	3
3. PERDAS DE N E EFICIÊNCIA DE USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA AGRICULTURA <i>N LOSSES AND THE EFFICIENT USE OF NITROGEN FERTILIZERS IN AGRICULTURE</i> ..	5
4. DIFERENTES FONTES DE N TÊM IMPACTO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS? <i>DOES DIFFERENT N SOURCES IMPACT CROP YIELDS?</i> .....	16
5. QUESTÕES AMBIENTAIS E AS OPÇÕES DE FONTES DE N: ALTO CUSTO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA <i>ENVIRONMENTAL ISSUES AND OPTIONS OF N FERTILIZERS: HIGH ENERGY REQUIREMENT AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS</i> .....	21
6. AMÔNIA VERDE <i>GREEN AMMONIA</i> .....	24
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS <i>FINAL REMARKS</i> .....	26
REFERÊNCIAS <i>REFERENCES</i> .....	29

# OPÇÕES DE FONTES DE NITROGÊNIO PARA A AGRICULTURA BRASILEIRA

## *OPTIONS OF SOURCES OF NITROGEN FOR BRAZILIAN AGRICULTURE*

Heitor CANTARELLA <sup>(1)</sup>

### RESUMO

A ureia (UR) é o fertilizante nitrogenado sólido predominante nos mercados brasileiro e mundial. Entre as vantagens da UR estão a alta concentração de N e o menor preço em relação às outras fontes de N. A principal desvantagem da UR é a possibilidade de ocorrência de altas perdas por volatilização de amônia ( $\text{NH}_3$ ) quando aplicada na superfície de solos. Adubos como o nitrato de amônio (NA), nitrato de amônio e cálcio (CAN) e sulfato de amônio (SA) têm perdas irrelevantes na forma de  $\text{NH}_3$  quando aplicados em solos ácidos, como os que predominam no Brasil. Com o advento da amônia verde, para a síntese da

### ABSTRACT

Urea (UR) is the predominant solid nitrogen fertilizer in the Brazilian and world markets. Among the advantages of this compound are the high concentration of N and the lower price compared to other sources of N. The main disadvantage of UR is the possibility of high losses by ammonia ( $\text{NH}_3$ ) volatilization when applied to the surface of soils. Fertilizers such as ammonium nitrate (AN), calcium ammonium nitrate (CAN), and ammonium sulfate (AS) have  $\text{NH}_3$  losses that are negligible when applied to acidic soils, such as those prevailing in Brazil. With the predicted arrival of green ammonia,

---

<sup>(1)</sup> Instituto Agronômico (IAC), Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais, Campinas (SP). heitor.cantarella@sp.gov.br

qual o gás natural é substituído por H<sub>2</sub> proveniente da eletrólise da água com o uso de energias renováveis (eólica ou solar), ou por biometano, a produção de UR deve ser reduzida e a oferta de adubos nitrogenados no mercado será alterada. Neste contexto, exceto pelo menor custo por unidade de N, a UR pode ser substituída, geralmente com vantagens, por NA, CAN ou SA.

**Palavras-chave:** ureia, nitrato de amônio, amônia verde, volatilização de amônia.

the mix of nitrogen fertilizers on the market will change and the production of UR shall be reduced. In green ammonia, natural gas, the source of CO<sub>2</sub> for urea, is replaced by H<sub>2</sub> from the electrolysis of water with renewable energies (wind or solar) or biomethane. In this context, UR can be replaced, usually with advantages, by AN, AS, or CAN.

**Key words:** urea, ammonium nitrate, green ammonia, ammonia volatilization.

## 1. INTRODUÇÃO

A UR é uma fonte importante de N, que domina os mercados de fertilizantes nitrogenados globais, e é amplamente utilizada por agricultores no Brasil e no mundo. Sua principal vantagem é o menor custo por unidade de N, comparada com outros fertilizantes. Esta publicação discute as possibilidades de substituição da UR por outras fontes de N na agricultura em um contexto em que a oferta de UR poderá ser reduzida em função de alterações tecnológicas provocadas pelo advento da NH<sub>3</sub> verde.

## 1. INTRODUCTION

UR is an important source of N which dominates the global nitrogen fertilizer markets and is widely used by farmers in Brazil and worldwide. Its main advantage is the lower cost per unit of N than other fertilizers. This publication discusses the possibilities of replacing UR with other sources of N in agriculture in a context where the supply of UR may be reduced due to technological changes caused by the advent of green NH<sub>3</sub>.

## 2. O MERCADO DE FERTILIZANTES

O consumo de fertilizantes nitrogenados no mundo atingiu 107,7 milhões de toneladas em 2019. O Brasil foi responsável por cerca de 4% do consumo, ou 4,7 milhões de toneladas (IFA - International Fertilizer Industry Association, 2019). Os principais fertilizantes nitrogenados utilizados no Brasil, segundo dados de 2020 da ANDA (Associação Nacional para a Difusão de Adubos) são ureia (UR), sulfato de amônio (SA), nitrato de amônio (NA) e nitrato de amônio e cálcio (CAN). A UR representa 54% do total, seguido de SA (10%), AN (9%) e CAN (3%). Adubos com base em nitrato de amônio (NA e CAN) englobam 12% do mercado (Tabela 1).

## 2. THE FERTILIZER MARKET

Consumption of nitrogen fertilizers in the world reached 107.7 million tonnes in 2019. Brazil accounted for approximately 4%, or 4.7 million tonnes (IFA-International Fertilizer Industry Association, 2019). The main nitrogen fertilizers used in Brazil in 2020, according to ANDA (National Association for the Diffusion of Fertilizers), are urea (UR), ammonium sulfate (AS), ammonium nitrate (AN), and calcium ammonium nitrate (CAN). UR represents 54% of the total, followed by AS (10%), AN (9%), and CAN (3%). Fertilizers based on ammonium nitrate (AN and CAN) account for 12% of the market (Table 1).



**Tabela 1.** Principais fertilizantes nitrogenados no mercado brasileiro*Table 1. Main nitrogen fertilizers in the Brazilian market*

Fertilizante <i>Fertilizer</i>	Concentração de N <i>N</i> <i>concentration</i>	Consumo aparente <i>Apparent</i> <i>consumption</i>	Participação no mercado brasileiro <i>Market share</i> <i>in Brazil</i>
	kg t <sup>-1</sup>	Milhões toneladas de N <i>Million tonne N</i>	%
Ureia/ <i>Urea</i>	450	2,54	54
Sulfato de amônio/ <i>Ammonium sulfate</i>	210	0,47	10
Nitrato de amônio/ <i>Ammonium nitrate</i>	330	0,41	9
Nitrato de amônio e cálcio (CAN) <i>Calcium ammonium nitrate (CAN)</i>	270	0,15	3
MAP, DAP, formulações, outros/ <i>other</i>	-	1,12	24
<b>Total</b>	-	<b>4,71</b>	<b>100</b>

Fonte: ANDA (2020), comunicação pessoal.

*Source: ANDA (2020), personal communication.*

Do mesmo modo que ocorre no Brasil, a UR domina amplamente o mercado mundial de fertilizantes nitrogenados sólidos, respondendo por cerca de 60% da oferta.

As principais razões para a preferência da indústria de fertilizantes para a produção de UR são a alta concentração de N no produto final (46%) e o fato deste fertilizante ser feito juntando a NH<sub>3</sub>, resultante da fixação de N atmosférico

As in Brazil, UR largely dominates the world market for solid nitrogen fertilizers, accounting for approximately 60% of the supply.

The main reasons for the fertilizer industry's preference for UR are the high N concentration (46%) and the convenience of the feedstock for its production, combining NH<sub>3</sub>, resulting from the atmospheric N<sub>2</sub> fixation by the

pelo processo Haber-Bosch, com o principal subproduto de sua síntese, o  $\text{CO}_2$ . Para a maioria dos demais fertilizantes, a  $\text{NH}_3$  é combinada com compostos provenientes de outros processos, tais como os ácidos nítrico, sulfúrico ou fosfórico, resultando em fertilizantes com concentrações de N inferiores às da UR.

Haber-Bosch process, with the main by-product of its synthesis,  $\text{CO}_2$ . For most other fertilizers,  $\text{NH}_3$  is combined with compounds from other processes, such as nitric, sulfuric, or phosphoric acids, resulting in fertilizers with lower N concentrations than UR.

### **3. PERDAS DE N E EFICIÊNCIA DE USO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS NA AGRICULTURA**

### **3. N LOSSES AND THE EFFICIENT USE OF NITROGEN FERTILIZERS IN AGRICULTURE**

Há várias maneiras de medir a eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados (EUN), mas, as mais simples são expressar a EUN como proporção entre a quantidade de N absorvida pelas plantas ou exportadas pelas colheitas em relação à quantidade de N fertilizante aplicada. O N não absorvido pode ser perdido para o ambiente por várias rotas, ou permanecer no solo, geralmente ligado à matéria orgânica.

There are several ways to measure nitrogen fertilizer use efficiency (NUE). The simplest ones express it as a ratio between the amount of N taken up by plants or exported by crops in relation to the amount of fertilizer N applied. Unabsorbed N can be lost to the environment by various routes or remain in the soil, usually bound to soil organic matter. The

A recuperação posterior do N da matéria orgânica do solo tem grande grau de incerteza, pois depende de mineralização das frações orgânicas. Além disso, não há métodos de análise de solo adequados para prever quanto deste N estará disponível. Porém, o N perdido do solo representa um obstáculo claro para o uso eficiente de fertilizantes.

As principais rotas de perdas de N incluem a lixiviação de nitrato, a volatilização de  $\text{NH}_3$ , as perdas de gases derivados de reações de redução de nitrato e as perdas por erosão ou escoamento superficial. Essas últimas são fruto do manejo inadequado do solo. O nitrogênio perdido com a água ou com o solo erodido é pouco afetado pelas fontes de N, ou seja, as perdas ocorrem com qualquer fertilizante. Perdas por lixiviação acontecem quando excesso de água percola pelo solo levando o N nítrico ( $\text{NO}_3^-$ ) que, por ter carga negativa, é pouco retido pelos colóides minerais ou orgânicos do solo que tem carga predominante negativa. Mas, não somente os fertilizantes contendo  $\text{NO}_3^-$  estão sujeitos à lixiviação. Fertilizantes

subsequent recovery of N from soil organic matter is highly uncertain, as it depends on its mineralization. Furthermore, there are no adequate methods of soil analysis to predict how much of this N will be available. Nonetheless, the N lost from the soil represents a clear obstacle to the efficient use of fertilizers.

The main routes of N losses include nitrate leaching,  $\text{NH}_3$  volatilization, gas losses derived from nitrate reduction reactions, and losses through erosion or run-off. The last-named ones are the result of inadequate soil management. Nitrogen lost with water or with eroded soil is little affected by N sources, that is, losses occur with any fertilizer. Leaching losses occur when excess water percolates through the soil, carrying nitrate N ( $\text{NO}_3^-$ ), which, due to its negative charge, is poorly retained by soil mineral or organic colloids, which have predominantly negative charges. But not only fertilizers containing  $\text{NO}_3^-$  are subject to leaching. Fertilizers

contendo N amídico, como a UR, ou contendo todo ou parte do N na forma amoniacal, como o SA, NA e CAN têm o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) oxidado a nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo. Essa oxidação, conhecida como nitrificação, é realizada por microrganismos comumente presentes no solo e ocorre em intervalo de tempo relativamente curto. Geralmente, após um mês, a maior parte do N no solo estará na forma de nitrato, especialmente em solos com a acidez corrigida e com umidade adequada, situações que predominam em solos agrícolas bem manejados.

Desse modo, as perdas por lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  se aplicam a todas as fontes de N, embora em alguns casos, somente após a transformação de  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NO}_3^-$ . A magnitude dessas perdas depende das condições climáticas. Períodos com excesso de chuvas ou irrigações inadequadas podem levar o  $\text{NO}_3^-$  das camadas superficiais, onde o sistema radicular se concentra, para camadas de subsolo onde o nutriente estará fora do alcance das raízes. As perdas por lixiviação de nitrato são muito importantes em algumas regiões do

containing amide N, such as UR, or containing all or part of the N in ammonium forms, such as AS, AN, and CAN, undergo oxidation to nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) in the soil. This oxidation, known as nitrification, is carried out by microorganisms common in soils and takes place in a relatively short time. Generally, after a month, most of the N in the soil will be in the form of nitrate, especially in soils with no excess acidity and adequate moisture, situations that predominate in well-managed agricultural soils.

Thus,  $\text{NO}_3^-$  leaching losses apply to all N sources, although in some cases, only after the oxidation of  $\text{NH}_4^+$  to  $\text{NO}_3^-$ . The magnitude of these losses depends on weather conditions. Periods with excessive rainfall or inadequate irrigation can take  $\text{NO}_3^-$  from the surface layers, where the root system is concentrated, to subsoil layers, where the nutrient will be out of reach of the roots. Nitrate leaching losses are highly relevant in some regions of the

mundo, especialmente naquelas com solos rasos e alta predominância de cargas negativas. Além do prejuízo econômico, o excesso de nitratos geralmente compromete a qualidade da água. No Brasil, as perdas por lixiviação por nitratos não são percebidas como muito significativas, pois as recomendações técnicas geralmente são para o parcelamento da adubação nitrogenada para evitar acúmulo de N no solo, em períodos em que as plantas não podem absorver o nutriente eficientemente. Além, disso, os solos brasileiros são, em sua maioria, profundos; alguns solos têm cargas positivas nas camadas subsuperficiais, que retardam a movimentação de  $\text{NO}_3^-$  (CANTARELLA, 2007).

Outras perdas de N do solo são as resultantes da redução de  $\text{NO}_3^-$  formando principalmente  $\text{N}_2$ , mas também óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Essas perdas geralmente ocorrem devido a processos de desnitrificação e dependem da ocorrência de condições anaeróbicas no solo, provocadas por excesso de água, por chuvas muito intensas ou pela combinação de chuvas com solos compactados ou

world, especially in those with shallow soils and a prevalence of negative charges. In addition to economic losses, excess nitrates generally compromise water quality. In Brazil, nitrate leaching is not perceived as very significant, as technical recommendations are for the split application of nitrogen fertilization to avoid the soil accumulation of N in periods when plants cannot efficiently absorb it. Furthermore, Brazilian soils are primarily deep; some soils have positive charges in the subsurface layers, which delay  $\text{NO}_3^-$  leaching (CANTARELLA, 2007).

Other N losses from soils result from the reduction of  $\text{NO}_3^-$  mainly to  $\text{N}_2$ , but also nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ). These losses are usually caused by denitrification and depend on anaerobic soil conditions caused by excess water, heavy rains, or the combination of showers with compacted or poorly aerated soils. Losses of  $\text{N}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  due

pouco arejados. Perdas de  $N_2$  e  $N_2O$  por desnitrificação são relevantes em solos alagados, como os cultivados com arroz, porém, são de difícil avaliação em solos agrícolas arejados (condições aeróbias ou de sequeiro). Há poucos dados sobre a magnitude das perdas por desnitrificação em solos de sequeiro.

O  $N_2O$  pode ser gerado também em condições aeróbias, no processo de nitrificação. A preocupação com esse gás é devida ao alto impacto do  $N_2O$  como gás de efeito estufa (GEE), pois seu potencial de aquecimento global equivale a aproximadamente 300 vezes o do  $CO_2$ . Porém, do ponto de vista de eficiência de uso de N, as perdas como  $N_2O$  são pouco relevantes, pois representam aproximadamente 1% do aplicado como fertilizante - valor usado como referência pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima).

As perdas de N por volatilização de amônia ( $NH_3$ ) são as mais importantes no Brasil devido ao modo como os fertilizantes nitrogenados são

to denitrification are relevant in flooded soils, such as those cultivated with rice; however, they are difficult to assess in well-aerated agricultural soils (aerobic or rainfed conditions). Few data are available on the magnitude of denitrification losses from rainfed soils.

Nitrous oxide can also be generated under aerobic conditions during nitrification. The concern with  $N_2O$  is that its global warming potential is approximately 300 times that of  $CO_2$ , turning it into an important greenhouse gas (GHG). However, from the point of view of N use efficiency, losses as  $N_2O$  are of little relevance as they represent approximately 1% of the N applied as fertilizer - the reference value used by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

On the other hand, N losses by ammonia ( $NH_3$ ) volatilization are most important in Brazil due to how nitrogen fertilizers are applied in Brazilian agriculture. The

usados na agricultura brasileira. A volatilização de  $\text{NH}_3$  depende do equilíbrio entre as espécies químicas amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), o íon, e amônia ( $\text{NH}_3$ ), o gás.



A predominância dessas espécies químicas no solo é função do pH do meio. Em meio alcalino ( $\text{pH} > 7$ ) predomina o gás. Em solos ácidos ( $\text{pH} < 7$ ) predomina a forma iônica, estável e não sujeita a ser transferida como gás para a atmosfera. Assim, em solos ácidos, fontes contendo N nítrico ou amoniacal não estão sujeitas a perdas relevantes por volatilização de  $\text{NH}_3$ . Porém, com a UR, essa regra é quebrada, pois a hidrólise deste fertilizante consome  $\text{H}^+$  do meio, alcalinizando o solo ao redor do fertilizante, levando o equilíbrio da reação acima na direção da produção de  $\text{NH}_3$ . A elevação do pH e a consequente formação de  $\text{NH}_3$  ocorre mesmo em solos ácidos. A hidrólise depende de umidade e é realizada por enzimas do grupo das ureases, bastante difundidas no solo e presentes em maiores concentrações na presença de palha

volatilization of  $\text{NH}_3$  depends on the balance on the soil surface between the chemical species ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), the ion, and ammonia ( $\text{NH}_3$ ), the gas.



The predominance of either chemical species in the soil is a function of the pH. In alkaline soils ( $\text{pH} > 7$ ), the gaseous form predominates. In acidic soils ( $\text{pH} < 7$ ),  $\text{NH}_4^+$  prevails.  $\text{NH}_4^+$  is stable and is not transferred as a gas to the atmosphere. Thus, in acidic soils, fertilizers containing nitrate or ammonium N are not prone to relevant losses by  $\text{NH}_3$  volatilization. However, with UR, this rule is broken, as UR hydrolysis consumes  $\text{H}^+$ , alkalizing the soil around the fertilizer and pushing the reaction equilibrium toward the production of  $\text{NH}_3$ . The increased pH around the UR granules and the consequent formation of  $\text{NH}_3$  occurs even in acidic soils. Hydrolysis depends on moisture and is carried out by enzymes from the urease group, which are ubiquitous in soils and occur in higher concentrations

ou resíduos vegetais. A atividade da enzima é mais alta em condições de temperaturas elevadas.

As chances de perdas de  $\text{NH}_3$  com a UR são altas, especialmente se o fertilizante for aplicado na superfície do solo, em áreas com resíduos vegetais (plantio direto, pastagens, cana colhida crua, culturas perenes com manejo de plantas invasoras sob a copa), condições bastante frequentes na agricultura brasileira. Se a UR for incorporada ao solo por meios mecânicos (>5 cm), chuva ou irrigação (>10 a 20 mm de lâmina de água), as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  passam a ser muito baixas ou nulas. Incorporada ao solo, a UR não tem desvantagem em termos de perdas de  $\text{NH}_3$  em relação aos outros fertilizantes. Entretanto, a incorporação do fertilizante nem sempre é viável ou desejável, como em culturas perenes, devido à destruição de raízes. A incorporação pode não ser factível na prática, como em grandes áreas em plantio direto ou com excesso de resíduos sobre o solo, que tornam a operação lenta ou dispendiosa. Além disso, as chuvas nem sempre

in the presence of straw or crop residues. Enzyme activity is highest under high temperatures.

The chances of  $\text{NH}_3$  loss with UR are high, especially if the fertilizer is surface-applied on soils, in areas with plant residues (no-tillage, pastures, green-harvested sugarcane, perennial crops with weed management under the canopy), conditions quite frequent in Brazilian agriculture. If UR is mechanically incorporated into the soil (>5 cm) or incorporated by rain or irrigation (>10 to 20 mm of water),  $\text{NH}_3$  volatilization losses become very low or null. Incorporated into the soil, UR has no disadvantage as of  $\text{NH}_3$  losses compared to other fertilizers. However, fertilizer incorporation is not always feasible or desirable due to damage to roots, as in perennial crops. Incorporation may not be feasible, as in large areas under no-till or soils with excess crop residues, making the operation slow or costly. Furthermore, rainfall is not always effective in incorporating UR into



são efetivas para incorporar a UR ao solo. Chuvisqueiros ou precipitações menores do que 5 a 10 mm podem ter efeito contrário, ou seja, provocam a dissolução da UR, fornecem a umidade necessária para a hidrólise e a volatilização de  $\text{NH}_3$ , mas não são suficientes para incorporar o adubo ao solo.

---

As chances de perdas de  $\text{NH}_3$  com a UR são altas especialmente se o fertilizante for aplicado na superfície do solo, em áreas com resíduos vegetais (plantio direto, pastagens, cana colhida crua, culturas perenes com manejo de plantas invasoras sob a copa), condições bastante frequentes na agricultura brasileira. Fertilizantes tais como SA, NA, CAN, que não perdem quantidades significativas de N por volatilização de  $\text{NH}_3$  em solos ácidos, que predominam no Brasil, são fontes preferíveis quando as chances de perdas de  $\text{NH}_3$  são altas.

---

Portanto, fertilizantes tais como o SA, o NA e o CAN, que não perdem quantidades significativas de N por volatilização de  $\text{NH}_3$  em solos ácidos, que predominam no Brasil, podem ser considerados como fontes preferíveis quando as chances de perdas de  $\text{NH}_3$  são altas.

the soil. Showers or precipitations smaller than 5 to 10 mm can have the opposite effect, that is, they cause the dissolution of the UR, supply the necessary moisture for UR hydrolysis and the subsequent  $\text{NH}_3$  volatilization, but are not sufficient to incorporate the fertilizer into the soil.

---

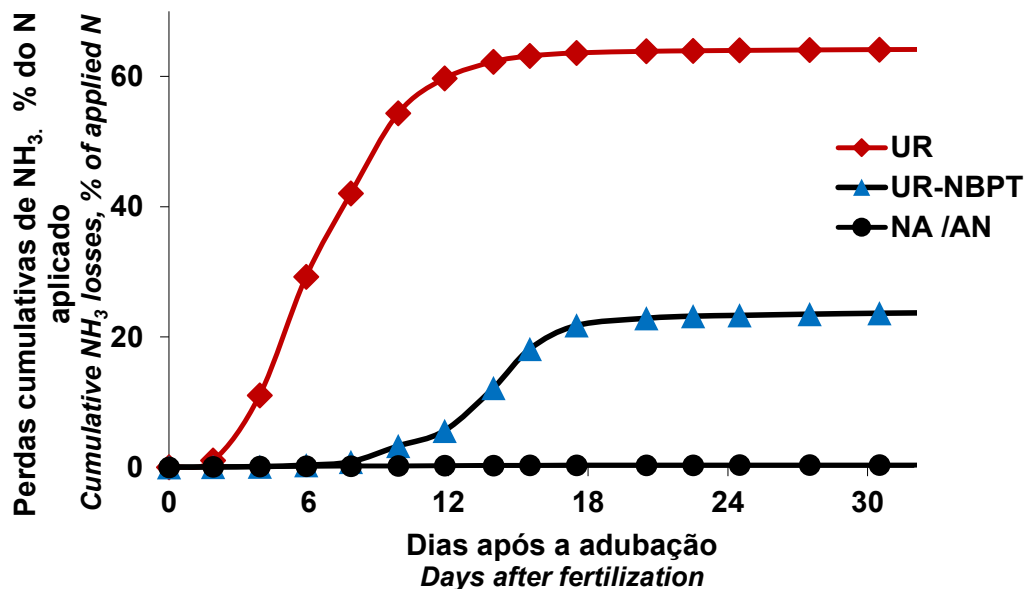
The chances of  $\text{NH}_3$  loss with UR are high, especially if the fertilizer is surface-applied to soils, in areas with plant residues (no-tillage, pastures, green-harvested sugarcane, perennial crops with weed management under the canopy), conditions quite frequent in Brazilian agriculture. Fertilizers such as AS, AN, and CAN, which do not lose significant amounts of N by  $\text{NH}_3$  volatilization in the predominantly acidic soils of Brazil, are preferable sources when the chances of  $\text{NH}_3$  losses are high.

---

Therefore, fertilizers such as AS, AN, and CAN, which do not lose significant amounts of N by  $\text{NH}_3$  volatilization in the predominantly acidic soils of Brazil, are preferable sources when the chances of  $\text{NH}_3$  losses are high.

Quanto se perde de N como  $\text{NH}_3$  com o uso de UR? Como as perdas são dependentes de condições de manejo e ambientais, tais como chuva e temperatura, difíceis de prever, as quantidades de N volatilizadas são muito variáveis. Podem ser pequenas ou nulas se a UR for incorporada, ou atingir 30% a 40% ou mais se as combinações de fatores forem favoráveis às perdas: aplicação superficial, em solo úmido, sob alta temperatura e presença de resíduos orgânicos. Portanto, na maioria das condições em que a adubação nitrogenada é realizada na agricultura brasileira, há riscos significativos de perdas de  $\text{NH}_3$  quando a UR é aplicada na superfície dos solos. As perdas de  $\text{NH}_3$  em estudos realizados em campo, em oito locais no estado de São Paulo, foram de 37% do N aplicado como UR (CHIEN et al., 2009). Uma meta-análise de 35 estudos mostrou perdas médias de  $\text{NH}_3$  equivalentes a 31% do N da UR utilizada (CANTARELLA et al., 2018; SILVA et al., 2017).

How much N is lost as  $\text{NH}_3$  when using UR? Losses depend on soil management and environmental conditions such as rainfall and temperature, which are difficult to predict, so the amounts of N volatilized may be widely variable. They can be small or null if the UR is incorporated into the soil or reach 30% to 40% or more if the combinations of factors are favorable to losses: surface application on moist soils, high temperature, and presence of organic residues. Therefore, in most situations in which nitrogen fertilization is carried out in Brazilian agriculture, there are significant risks of  $\text{NH}_3$  loss when UR is surface-applied.  $\text{NH}_3$  losses in studies carried out under the field conditions in eight sites in the state of São Paulo were, on average, 37% of the N applied as UR (CHIEN et al., 2009). A meta-analysis of 35 studies showed mean  $\text{NH}_3$  losses equivalent to 31% of the UR-N (CANTARELLA et al., 2018; SILVA et al., 2017).



**Figura 1.** Perdas de N por volatilização de amônia em milho sob plantio direto. Fonte: Adaptado de Chien et al. (2009).

**Figure 1.** N losses by ammonia volatilization in maize under no-tillage. NBPT: urease inhibitor. Adapted from Chien et al. (2009).

Para reduzir problemas ambientais associados às perdas de  $\text{NH}_3$ , países como a Alemanha e a Dinamarca passaram a exigir que a UR seja incorporada ao solo ou tratada com um inibidor de urease para reduzir a volatilização (CANTARELLA et al., 2018; GUELFİ et al., 2021).

To reduce environmental impacts associated with  $\text{NH}_3$  losses, countries such as Germany and Denmark now require that UR be incorporated into the soil or amended with a urease inhibitor to reduce volatilization (CANTARELLA et al., 2018; GUELFİ et al., 2021).

De fato, os inibidores de urease são uma opção para reduzir as perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização (CANTARELLA et al., 2018). As pesquisas mostram que a adição de inibidor de urease à UR reduz significativamente, mas não elimina as perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização. No solo ácido da área do estudo mostrado na figura 1, coberto com palha (sob plantio direto), as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  foram de 64% do N aplicado como UR; porém, elas decresceram para 24% do N aplicado como UR contendo um inibidor de urease (redução de 64% em relação à UR não tratada). Para o NA, as perdas foram de somente 0,4% do N. Em outros estudos realizados em vários locais, a redução média de perdas com o uso de NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) foi de 60% (CHIEN et al., 2009) e 55% (CANTARELLA et al., 2018; SILVA et al., 2017). Ou seja, em ambientes com altos potenciais de perdas por volatilização, fertilizantes mais estáveis, tais como SA, AN e CAN têm vantagens sobre a UR.

Indeed, urease inhibitors can reduce  $\text{NH}_3$  losses by volatilization (CANTARELLA et al., 2018). Research results show that adding a urease inhibitor to the UR significantly reduces, but does not eliminate,  $\text{NH}_3$  losses by volatilization. In the acidic soil of the study area shown in figure 1, covered with a straw mulch (under no-tillage), the  $\text{NH}_3$  volatilization losses were 64% of the N applied as UR; however, they decreased to 24% of N applied as UR containing a urease inhibitor (64% reduction from untreated UR). For AN, losses were only 0.4% of N. In other studies, conducted at various sites, the average decrease in losses with the use of NBPT (N-(n-butyl) thiophosphoric triamide) was 60% (CHIEN et al., 2009) and 55% (CANTARELLA et al., 2018; SILVA et al., 2017). In environments with high potential losses by volatilization, more stable fertilizers such as AS, AN, and CAN have advantages over UR.

#### **4. DIFERENTES FONTES DE N TÊM IMPACTO SOBRE A PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS?**

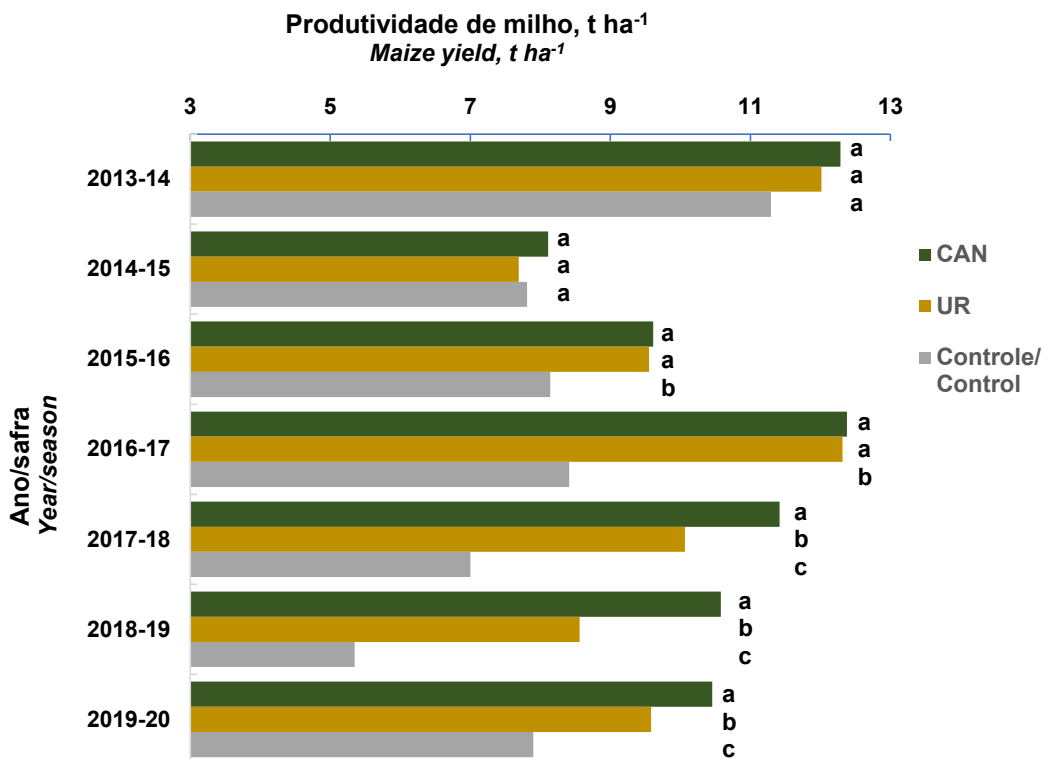
Como todos os fertilizantes nitrogenados têm em comum a alta solubilidade e a pronta disponibilidade do nutriente para as plantas, a resposta para esta questão depende da ocorrência de perdas de N do solo ou de efeitos secundários, como a acidificação. Em geral, os fertilizantes nitrogenados contendo N amídico ou amoniacal provocam a acidificação do solo devido à nitrificação; o adubo mais acidificante é o SA. Para essa fonte de N são necessários 5,3 kg de calcário para neutralizar a acidez causada por cada quilograma de N. Já a UR e o NA são um pouco menos acidificantes (1,8 kg de calcário para 1 kg de N). Porém, como a calagem é uma prática usual na agricultura, o efeito acidificante dos fertilizantes é contornado com bom manejo do solo. Se a acidificação é manejável, o N perdido do sistema solo-planta afeta diretamente a eficiência de uso

#### **4. DOES DIFFERENT N SOURCES IMPACT CROP YIELDS?**

As all nitrogen fertilizers have in common the high water solubility and ready availability of the N for plants, the answer to this question depends on the occurrence of N losses from soil or secondary effects such as acidification. In general, nitrogen fertilizers containing amide- or ammonium-N cause soil acidification due to nitrification. The most acidifying fertilizer is AS. For this N, 5.3 kg of lime are needed to neutralize the acidity caused by each kilogram of N applied to soils. On the other hand, UR and AN are a little less acidifying (1.8 kg of lime for 1 kg of N). However, as liming is a common practice in agriculture, the acidifying effect of fertilizers is circumvented with proper soil management. If acidification is manageable, the N lost from the soil-plant system directly affects

dos diversos fertilizantes uma vez que nesse caso, o N é removido do solo ou levado para camadas com poucas raízes. Os riscos de perdas por lixiviação podem ser considerados semelhantes para a maioria dos adubos nitrogenados, como discutido acima. No entanto, as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  impactam mais fortemente as formulações contendo UR, pelos motivos comentados anteriormente.

the N use efficiency of different fertilizers since, in this case, N is removed from the soil or transported to deep layers with fewer roots. The risks of leaching losses can be considered similar for most nitrogen fertilizers, as discussed above. However,  $\text{NH}_3$  volatilization losses have a more substantial impact on UR for the reasons mentioned above.



**Figura 2.** Comparação de fontes de N em milho em sete safras consecutivas. Produtividades (barras) seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente. Fonte: Adaptado de Otto et al. (2021).

*Figure 2. Comparing N sources in maize in seven consecutive seasons. Yields (bars) followed by the same letter do not differ statistically. Adapted from Otto et al. (2021).*

As vantagens de fontes como SA, NA ou CAN dependem, portanto, das condições de uso da UR e dos diferenciais de preços. Embora as perdas potenciais de  $\text{NH}_3$  com o uso de UR possam ser bastante altas, há situações em que as perdas podem ser pequenas, dependendo de fatores de manejo e ambientais, conforme já mencionado no presente texto. De fato, vários estudos de curto prazo mostram que, apesar da ocorrência de perdas de N por volatilização de  $\text{NH}_3$ , as produtividades podem ser pouco afetadas. Isso confunde técnicos e agricultores, que ficam sem entender a lógica dos resultados. Na verdade, a explicação é até simples. O solo é o grande fornecedor de nutrientes para as plantas, inclusive de N. Geralmente, parte substancial do N que as plantas absorvem durante o ciclo produtivo vem do solo; os fertilizantes complementam a necessidade das culturas. Assim, as perdas acabam sendo camufladas pelo suprimento do solo e nem sempre são refletidas na produtividade em curto prazo. Porém, estudos de longa duração mostram um cenário diferente. O N perdido por volatilização se dispersa na atmosfera e não recarrega o estoque do

The advantages of sources such as AS, AN, or CAN, therefore, depend on how UR is used and on price differences. Although the potential losses of  $\text{NH}_3$  with UR can be quite high, there are situations where the losses may be small, depending on management and environmental factors, as already mentioned in this text. In fact, several short-term studies show that yields may be little affected despite N losses by  $\text{NH}_3$  volatilization. This confuses agronomists and farmers, who do not understand the logic of the results. The explanation is quite simple. Soil is the major supplier of nutrients for plants, including N. Generally, a substantial part of the N that plants absorb during the production cycle comes from the soil; fertilizers supplement the needs of crops. Thus, losses are concealed by soil supply and are not always reflected in yields in the short term. However, long-term studies show a different picture. The N lost by volatilization is dispersed in the atmosphere and does not recharge the soil

solo – aquele que fornece o nutriente para a planta. Com o tempo, o solo se empobrece e começa a faltar N. Nessas condições, as diferenças de fontes sujeitas ou não sujeitas a volatilização ficam claras, como mostram os resultados obtidos em pesquisa realizada pela Dra. Conceição Carvalho (Figura 2). Neste estudo de longo prazo, até o quinto ano não houve diferença significativa na produtividade do milho entre a UR e o CAN. A partir do sexto ano as diferenças de produtividade ficaram evidentes. Em 2019/20, as produtividades de milho obtidas com CAN foram cerca de 1 t ha<sup>-1</sup> maiores do que no tratamento com UR (Figura 2). Resultados semelhantes foram obtidos para café, algodão e feijão (OTTO et al., 2021).

Cantarella et al. (2003) também observaram em laranja (Figura 3), padrão de resposta a fontes de N parecidos com os da figura 2. Nos primeiros anos, as produtividades de fruta foram semelhantes para a UR e o NA, embora medidas de volatilização de NH<sub>3</sub> no campo mostrassem perdas significativas. No caso de culturas perenes, além do

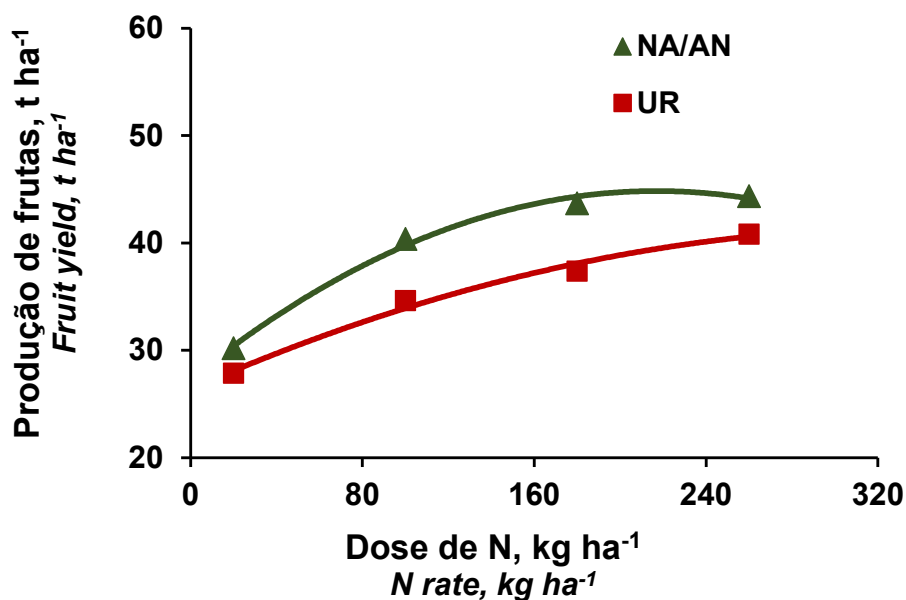
stock – the one that provides the nutrient for the plant. Over time, the soil becomes impoverished, and N runs out. Under these conditions, the differences between sources subject to or not subject to volatilization become apparent, as shown in the investigation carried out by Conceição Carvalho (Figure 2). Until the fifth year, there was no significant difference in corn yield between UR and CAN in this long-term study. From the sixth year on, yield differences became evident. In 2019/20, corn yields obtained with CAN were about 1 t ha<sup>-1</sup> higher than with the UR treatment (Figure 2). Similar results were reported for other crops, such as coffee, cotton, and beans (OTTO et al., 2021).

Cantarella et al. (2003) also observed a response pattern to N sources in orange (Figure 3) similar to those in figure 2. In the first years, fruit yields were similar for UR and AN, although measures of NH<sub>3</sub> volatilization in the field showed significant losses. In the case of perennial crops, in addition to the soil,



solo, o estoque de N nos tecidos das plantas muitas vezes é suficiente para mascarar as ineficiências da adubação por algum tempo. Porém, a partir do quinto ano, as produtividades de laranja obtidas com o NA passaram a ser significativamente superiores às das áreas que receberam a UR: por exemplo, nas parcelas adubadas com 180 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de NA, as produtividades médias de laranjas atingiram 44 t ha<sup>-1</sup>, mas apenas 37 t ha<sup>-1</sup> nas áreas que receberam igual dose de N como UR (Figura 3).

the stock of N in plant tissues is often sufficient to mask the inefficiencies of fertilizer for some time. However, from the fifth year onwards, orange yields obtained with AN became significantly higher than those of areas that received UR: for example, in plots fertilized with 180 kg ha<sup>-1</sup> of N in the form of AN, average orange yields reached 44 t ha<sup>-1</sup>, but only 37 t ha<sup>-1</sup> in areas with the same N dose as UR (Figure 3).



**Figura 3.** Resposta da cultura de laranja à adubação com NA e UR. Resultados da quinta safra. Fonte: Adaptado de Cantarella et al. (2003).

*Figure 3.* Orange yield response to fertilization with AN and UR. Data from the fifth year. Adapted from Cantarella et al. (2003).

## **5. QUESTÕES AMBIENTAIS E AS OPÇÕES DE FONTES DE N: ALTO CUSTO ENERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

Os fertilizantes minerais são produzidos a partir de  $\text{NH}_3$ , cuja síntese utiliza o  $\text{N}_2$  atmosférico, que é reduzido a  $\text{NH}_3$  pelo processo Haber-Bosch, empregando, como fonte de  $\text{H}^+$  principalmente gás natural, mas, também, outros combustíveis fósseis. A produção de  $\text{NH}_3$  requer grandes quantidades de energia e resulta na emissão de GEE. Para cada tonelada de  $\text{NH}_3$  produzida são necessários de 30 a 43 GJ de energia, dependendo da tecnologia utilizada (HOXHA; CHRISTENSEN, 2019) ou entre 770 e 1.100  $\text{m}^3$  de gás natural. O processo gera a emissão de grandes quantidades de GEE: 1,92  $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$  de  $\text{NH}_3$  a 3,68  $\text{tCO}_2\text{e}/\text{tNH}_3$ , também dependendo da tecnologia e do local onde a  $\text{NH}_3$  é produzida (FERTILIZERS EUROPE, 2022).

## **5. ENVIRONMENTAL ISSUES AND OPTIONS OF N FERTILIZERS: HIGH ENERGY REQUIREMENT AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS**

Mineral fertilizers are produced from  $\text{NH}_3$ , for whose synthesis atmospheric  $\text{N}_2$  is reduced to  $\text{NH}_3$  by the Haber-Bosch process, using  $\text{H}_2$  mainly from natural gas and other fossil fuels. The production of  $\text{NH}_3$  requires large amounts of energy and results in GHG emissions. For each tonne of  $\text{NH}_3$  synthesized, 30 to 43 GJ of energy is needed, depending on the technology used (HOXHA; CHRISTENSEN, 2019), or between 770 and 1,100  $\text{m}^3$  of natural gas. The process generates the emission of large amounts of GHG: 1.92  $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$  of  $\text{NH}_3$  to 3.68  $\text{tCO}_2\text{e}/\text{tNH}_3$ , also depending on the technology and the place where the  $\text{NH}_3$  is produced (FERTILIZERS EUROPE, 2022).

Além das emissões diretas de GEE para a síntese da  $\text{NH}_3$  e fabricação dos fertilizantes produzidos com essa matéria-prima, ocorrem emissões de GEE quando fertilizantes são utilizados no campo, principalmente na forma de  $\text{N}_2\text{O}$ . Esse gás é gerado por processos naturais do ciclo do N no solo, como a nitrificação e a desnitrificação (SOARES et al., 2016). Com isso, há a preocupação em otimizar o uso de fertilizantes nitrogenados a fim de obter os melhores benefícios deste importante insumo para a produção agrícola e reduzir os impactos ambientais.

As emissões totais de GEE, que incluem  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , expressas em equivalente  $\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_{2e}$ ) são em torno de 10 kg  $\text{CO}_{2e}$  por quilograma de N utilizado como fertilizante. Desse total, aproximadamente 4,7 kg  $\text{CO}_{2e}$  se referem às perdas de  $\text{N}_2\text{O}$  que acontecem após a adubação, o restante é de emissões na fabricação do fertilizante e emissões indiretas ( $\text{CO}_2$  emitido a partir do uso de calcário necessário para neutralizar a acidez dos fertilizantes nitrogenados, perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$ , entre outras) (BRENTROP et al., 2016).

In addition to direct GHG emissions from the synthesis of  $\text{NH}_3$  and the manufacture of fertilizers with this raw material, GHG emissions occur when fertilizers are applied to fields, mainly in  $\text{N}_2\text{O}$ . This gas is generated by natural processes of the N cycle in soils, such as nitrification and denitrification (SOARES et al., 2016). Therefore, optimizing the use of nitrogen fertilizers is necessary to obtain the best benefits from this vital input for agricultural production and reduce environmental impacts.

Total GHG emissions, which include  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$ , expressed in  $\text{CO}_2$  equivalent ( $\text{CO}_{2e}$ ), are around 10 kg  $\text{CO}_{2e}$  per kilogram of N used as fertilizer. Of this total, approximately 4.7 kg  $\text{CO}_{2e}$  refers to  $\text{N}_2\text{O}$  losses that occur in the field after fertilization; the remainder is emissions in the manufacture of fertilizer and indirect emissions ( $\text{CO}_2$  emitted from the use of lime to neutralize the acidity caused by nitrogen fertilizers, losses due to  $\text{NH}_3$  volatilization, among others) (BRENTROP et al., 2016). For

Por exemplo, uma cultura que recebe 200 kg ha<sup>-1</sup> de N como fertilizante, gera a emissão de GEE de cerca de 2.000 kg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2e</sub>. A alta pegada de carbono associada aos fertilizantes nitrogenados tem levado muitos países a criarem legislações para incentivar o aumento da eficiência de uso de N na agricultura ou mesmo a restringir as doses de N que podem ser usadas pelos agricultores (GEUPEL et al., 2021).

Estudo recente mostrou, por meio de análise de ciclo de vida, que 40% a 50% das emissões de GEE para a produção de etanol de cana-de-açúcar são devidas ao uso de fertilizantes nitrogenados para produzir a cana (CARVALHO et al., 2021). Várias pesquisas mostram que as emissões de N<sub>2</sub>O no campo, resultante do uso de adubos nitrogenados, tendem a ser menores com NA ou CAN do que com UR. Carvalho et al. (2021) calcularam as emissões de N<sub>2</sub>O de vários fertilizantes nitrogenados com base em estudos realizados no Brasil. Os autores relataram que as porcentagens do N aplicado no campo emitidas como N<sub>2</sub>O (o chamado fator de emissão) para NA, SA e UR foram 0,59%, 0,49% e

example, a crop fertilized with 200 kg ha<sup>-1</sup> of N generates approximately 2,000 kg ha<sup>-1</sup> of CO<sub>2e</sub>. The high carbon footprint associated with nitrogen fertilizers has led many countries to issue legislation to encourage the efficient use of N fertilizers in agriculture or even to restrict the N doses farmers are allowed to use (GEUPEL et al., 2021).

A recent study showed, through life cycle analysis, that 40% to 50% of GHG emitted to produce sugarcane ethanol is due to using nitrogen fertilizers to grow the crop (CARVALHO et al., 2021). Several surveys show that N<sub>2</sub>O emissions in the field, resulting from using nitrogen fertilizers, tend to be lower with AN or CAN than with UR. Carvalho et al. (2021) calculated N<sub>2</sub>O emissions from various nitrogen fertilizers based on studies carried out in Brazil. The authors reported that the percentages of field-applied N emitted as N<sub>2</sub>O (the so-called emission factor) for AN, AS, and UR were 0.59%, 0.49%, and 0.82%, respectively. In a study of three

0,82%, respectivamente. Em artigo com dados de três ciclos de cana-de-açúcar, Degaspari et al. (2020) observaram resultados semelhantes: para a UR, o fator de emissão variou de 0,73% a 1,13% e para o CAN, de 0,38% a 0,68% do N aplicado. Os valores parecem pequenos, mas, deve-se lembrar que o impacto do  $N_2O$  no aquecimento global é cerca de 300 vezes o do  $CO_2$ , ou seja, para o cálculo da pegada de carbono, esses números devem ser multiplicados por 300. Pequenas variações nos valores do fator de emissão podem resultar em diferenças significativas na pegada de carbono da cultura adubada.

sugarcane cycles, Degaspari et al. (2020) observed similar results: for UR, the emission factors ranged from 0.73% to 1.13%, and for CAN, from 0.38% to 0.68% of the applied N. The values seem small, but it should be taken into consideration that the impact of  $N_2O$  on global warming is about 300 times that of  $CO_2$ ; that is, to calculate the carbon footprint, these numbers must be multiplied by 300. Minor variations in the emission factor can result in significant differences in the carbon footprint of the fertilized crop.

## 6. AMÔNIA VERDE

Uma das medidas planejadas pela indústria para reduzir a pegada de carbono na fabricação de fertilizantes nitrogenados é produzir “amônia verde”. Atualmente, a redução química de  $N_2$  atmosférico a  $NH_3$  é feita com o uso de gás natural, carvão ou outro combustível fóssil, processo que gera a “amônia marrom”, com a consequente emissão de GEE. Para a amônia verde,

## 6. GREEN AMMONIA

One of the measures planned by the industry to reduce the carbon footprint in manufacturing nitrogen fertilizers is to produce “green ammonia”. Currently, the chemical reduction of atmospheric  $N_2$  to  $NH_3$  is carried out using natural gas, coal, or other fossil fuel, generating “brown ammonia” with the consequent emission

ao invés de combustíveis fósseis, energias renováveis tais como a energia eólica e solar são empregadas para produzir  $H_2$  por meio da eletrólise da água. Com isso, grandes quantidades de  $CO_2$  deixam de ser emitidas para a atmosfera na fabricação de fertilizantes nitrogenados. A amônia também é considerada verde se for feita a partir de biometano, ou seja, metano gerado a partir de resíduos orgânicos agrícolas, urbanos ou industriais. Nesse caso, o biometano substitui o gás natural no processo industrial.

A viabilidade técnica da produção de amônia verde está comprovada. Os custos ainda são mais altos do que a amônia feita com insumos fósseis, mas, os preços devem baixar com o tempo.

Como os insumos fósseis são substituídos no processo de síntese de  $NH_3$ , grandes volumes de  $CO_2$  deixam de ser gerados. Com isso, a UR passa a não ser um produto atraente por falta de uma das matérias-primas, o  $CO_2$ . A amônia verde provavelmente será usada para a fabricação de outros fertilizantes, especialmente o NA e o CAN, ou será comercializada como

of GHGs. For green ammonia, instead of fossil fuels, renewable energies such as wind and solar energy are employed to produce  $H_2$  through water electrolysis. With this, large amounts of  $CO_2$  are no longer produced to manufacture nitrogen fertilizers. Ammonia is also considered green if made from biomethane, that is, methane generated from organic agricultural, urban, or industrial wastes. In this case, biomethane replaces natural gas in the industrial process.

The technical feasibility of producing green ammonia has been proven. Costs are still higher than ammonia made with fossil inputs, but prices should decrease over time.

As fossil inputs are replaced in  $NH_3$  synthesis, much less  $CO_2$  is generated. As a result, the production of UR is no longer attractive due to the lack of one of the raw materials,  $CO_2$ . Green ammonia will likely be converted into other fertilizers, especially AN and CAN, or it will be marketed as anhydrous  $NH_3$  or  $NH_3$  solutions

NH<sub>3</sub> para a produção de aquamônia. Porém, esse fertilizante na forma de solução de gás requer equipamentos específicos para aplicação no campo, o que pode desestimular o seu uso, como, de fato, já ocorre. Portanto, as mudanças que provavelmente ocorrerão no sentido da produção de fertilizantes nitrogenados mais sustentáveis ambientalmente levarão à maior oferta de NA e CAN no mercado atualmente dominado pela UR.

(aquammonia). However, gas or gas solution fertilizers require specific equipment for field application, which may discourage their use, as, in fact, it already occurs. Therefore, the shifts likely to occur toward producing more environmentally sustainable nitrogen fertilizers will lead to a greater supply of AN and CAN in a market currently dominated by UR.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A UR é atualmente o fertilizante nitrogenado sólido predominante no mercado brasileiro e mundial. Esse adubo tem como vantagem o menor preço e maior concentração de nutriente em comparação com outras fontes de N. Sua principal desvantagem é o risco de altas perdas por volatilização de NH<sub>3</sub> quando aplicada na superfície de solos, tanto ácidos quanto alcalinos. Os riscos com o uso de UR podem ser praticamente eliminados com a correta incorporação ao solo, ou

## **7. FINAL REMARKS**

UR is currently the predominant solid nitrogen fertilizer in the Brazilian and world markets. This fertilizer has the advantage of lower price and higher nutrient concentration than other N sources. Its primary disadvantage is the risk of high losses through NH<sub>3</sub> volatilization when surface-applied to both acidic and alkaline soils. Risks with the use of UR can be practically eliminated with the correct incorporation into the soil

reduzidos, com o uso de inibidores de urease.

Fertilizantes contendo N amoniacal ou nítrico, tais como SA, NA, CAN, entre outros, não estão sujeitos a perdas significativas por volatilização de  $\text{NH}_3$  em solos ácidos, como os predominantes no Brasil. Portanto, em tais solos, esses fertilizantes apresentam vantagens em relação à UR por não necessitarem de aditivos ou incorporação ao solo.

---

A UR pode ser substituída por outros fertilizantes nitrogenados capazes de suprir N às plantas com menor risco de perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  e menores emissões de GEE.

---

Não há diferenças significativas entre as diversas fontes de N com relação a outras perdas de N do solo (lixiviação, desnitrificação, erosão). Por outro lado, dados disponíveis mostram que o NA, o CAN e o SA parecem resultar em menores perdas de  $\text{N}_2\text{O}$ , potente GEE, do que a UR.

Uma nova geração de fertilizantes produzidos a partir de amônia verde, com baixa pegada

or reduced when UR is amended with urease inhibitors.

Fertilizers containing ammonia or nitrate N, such as AS, AN, and CAN, are not subject to significant losses by  $\text{NH}_3$  volatilization in acid soils, such as those prevalent in Brazil. Therefore, these fertilizers have advantages over UR in such soils as they do not require additives or incorporation into the soil.

---

UR can be replaced by other nitrogen fertilizers capable of supplying N to plants with a lower risk of losses due to  $\text{NH}_3$  volatilization and smaller GHG emissions.

---

There are no significant differences between most N fertilizers regarding other soil N losses (leaching, denitrification, ran off). On the other hand, available data show that AS, AN, and CAN seem to result in lower losses of  $\text{N}_2\text{O}$ , a potent GHG, than UR.

A new generation of fertilizers produced from green ammonia, with a low environmental



ambiental, deve aos poucos chegar ao mercado nos próximos anos. Com a substituição das principais matérias-primas usadas atualmente para a síntese da  $\text{NH}_3$  (gás natural e outros insumos de origem fóssil) por fontes de energia renováveis, menos  $\text{CO}_2$  será gerado. Assim, com o advento da amônia verde, a proporção de UR, entre os fertilizantes nitrogenados deve se reduzir em relação à produção atual. A oferta de outros fertilizantes nitrogenados deverá aumentar gradualmente, embora a UR possivelmente continue a ter participação relevante no mercado.

Exceto pelo menor preço e custo de logística, a UR não tem benefícios que não possam ser contornados quando comparada a outras fontes de N. Desse modo, a UR pode ser facilmente substituída por outros fertilizantes nitrogenados, que além de eficientes para suprir N às plantas, podem ter outras vantagens comparativas, como menor risco de perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$  e menores emissões de GEE.

footprint, should gradually reach the market in the coming years. With the replacement of the main raw materials currently used for synthesizing  $\text{NH}_3$  (natural gas and other inputs of fossil origin) with renewable energy sources, less  $\text{CO}_2$  will be generated. Thus, with the advent of green ammonia, the proportion of UR among nitrogen fertilizers should be reduced in relation to the current output. The supply of other nitrogen fertilizers should gradually increase, although UR may continue to have a relevant market share.

Except for the lower price and logistics cost, UR does not have benefits that cannot be circumvented compared to other sources of N. Thus, UR can be easily replaced by other nitrogen fertilizers, which, in addition to being efficient in supplying N to crops, may have other comparative advantages, such as a lower risk of losses due to  $\text{NH}_3$  volatilization and lower GHG emissions.

## REFERÊNCIAS

### *REFERENCES*

BRENTROP, F.; HOXHA, A.; CHRISTENSEN, B. Carbon footprint analysis of mineral fertilizer production in Europe and other world regions. In: International Conference on Life Cycle Assessment of Food 2016, 10th, 2016, Dublin. **Proceedings...** Dublin, 2016. 9 p.

CANTARELLA, H.; MATTOS JR., D.; 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: NOVAES, R. F.; HUGO, A. V. V.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19-27, 2018.

CARVALHO, J. L. N.; OLIVEIRA, B. G.; CANTARELLA, H.; CHAGAS, M. F.; GONZAGA, L. C.; LOURENÇO, K. S.; BORDONAL, R. O.; BONOMI, A. Implications of regional N<sub>2</sub>O-N emission factors on sugarcane ethanol emissions and granted decarbonization certificates. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, 111423. 2021.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, v. 102, p. 267-322, 2009.

DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N<sub>2</sub>O and NH<sub>3</sub> in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, p. 329-344. 2020.

FERTILIZERS EUROPE. Fertilizers Europe Overview 2021/22. **Fertilizers Europe**, Brussels. 32 p., 2022.

GEUPEL, M.; HELDSTAB, J.; SCHÄPPI, B.; REUTIMANN, J.; BACH, M.; HÄUßERMANN, U.; KNOLL, L.; KLEMENT, L.; BREUER, L. A national nitrogen target for Germany. **Sustainability**, v. 13, 1121, 2021.

GUELFY, D.; SILVA, R. C. D.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Avanços nas pesquisas e tecnologias para fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. **Temas em Ciência do Solo**, v. 11, p. 101-159. 2021.

HOXHA, A.; CHRISTENSEN, B. The carbon footprint of fertiliser production: regional reference values. In: International Fertiliser Society Conference 2018, 2019, Praga, **Proceedings...** London, 2019, 21 p.

IFA - International Fertilizer Industry Association. Fertilizer consumption in Brazil and world. p. 2. IFA, Paris, France. 2019. <https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>.

OTTO, R.; CANTARELLA, H.; GUELFY, D.; CARVALHO, M. C. S. Nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba. n. 9, mar. 2021. NPTC, p. 30-50.

SILVA, A. G. B.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A.; OTTO, R. Urease inhibitor NBPT on ammonia volatilization and crop productivity: A meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 109, p. 1-13. 2017.

SOARES, J. R.; CASSMAN, N. A.; KIELAK, A. M.; PIJL, A.; CARMO, J. B.; LOURENÇO, K. S.; LAANBROEK, H. J.; CANTARELLA, H.; KURAMAE, E. E. Nitrous oxide emission related to ammonia-oxidizing bacteria and mitigation options from N fertilization in a tropical soil. **Scientific Reports**, v. 6, 30349. 2016.

**Instituto Agrônomo**  
Av. Barão de Itapura, 1.481  
13020-902 - Campinas (SP) BRASIL  
Fone: (19) 2137-0600  
[www.iac.sp.gov.br](http://www.iac.sp.gov.br)



**Medindo perdas de  $\text{NH}_3$  em condições controladas em laboratório**  
*Measuring  $\text{NH}_3$  volatilization under controlled conditions*



**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO**  
Secretaria de Agricultura e Abastecimento