



LUCAS BARTELEGA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS CONVENCIONAIS,
ESTABILIZADOS, DE LIBERAÇÃO LENTA, CONTROLADA
E BLENDS PARA O CAFEIRO**

**LAVRAS-MG
2018**

LUCAS BARTELEGA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS CONVENCIONAIS, ESTABILIZADOS, DE
LIBERAÇÃO LENTA, CONTROLADA E BLENDS PARA O CAFEIEIRO**

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

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Orientador

**LAVRAS-MG
2018**

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

Bartelega, Lucas .

Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de
liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro / Lucas
Bartelega. - 2018.

68 p.

Orientador(a): Douglas Ramos Guelfi Silva.

.
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Perdas de amônia. 2. Inibidor de urease. 3. Ureia. I. Silva,
Douglas Ramos Guelfi. . II. Título.

LUCAS BARTELEGA

**FERTILIZANTES NITROGENADOS CONVENCIONAIS, ESTABILIZADOS, DE
LIBERAÇÃO LENTA, CONTROLADA E BLENDS PARA O CAFEIRO**

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

APROVADA em 27 de março de 2018.

Dr. Cícero Célio Figueiredo	UnB
Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva	UFLA
Dr. Guilherme Lopes	UFLA
Dr. Rubens José Guimarães	UFLA

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Orientador

Lavras – MG

2018

A todos os produtores rurais do Brasil, que mediante as dificuldades e os riscos persistem em suas atividades, garantindo alimento para o mundo.

A todos os professores que estão por trás de cada profissional formado, que seguem firmes e motivados em sua missão.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado forças e coragem para enfrentar as dificuldades que surgiram ao longo desta caminhada.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade de fazer o curso de mestrado mediante a profissionais de alto nível.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e concessão de bolsa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro os estudos.

Aos professores que estiveram envolvidos na minha formação, diante de grande sabedoria pude enriquecer os meus conhecimentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva, pela paciência, sabedoria e profissionalismo, contribuindo para o sucesso da minha formação, a quem levo como exemplo para a vida profissional.

Ao professor Dr. Rubens, Tainá e Anderson, pelo auxílio no experimento e ao Departamento de Agricultura que cedeu a área para experimentação.

Aos meus pais, Márcio e Eliane, que me deram os mais sábios ensinamentos, fazendo de mim um profissional ético, responsável.

À minha esposa Jéssica, às minhas irmãs Analice e Viviane, e todos os demais familiares que sempre me apoiaram e deram auxílio nos momentos de dificuldade.

Aos amigos que fiz neste tempo de estudo no Departamento de Ciência do Solo, em especial: Mateus, Otávio, Taylor, André Baldansi, Everton, André Leite, Leandro, Rúbio, Lucas Castelari, os quais levo para a vida toda.

RESUMO

A ureia é a fonte de fertilizante nitrogenado mais utilizado na cafeicultura. Quando aplicada ao solo, entra em contato com a água e sofre uma reação de hidrólise catalisada pela enzima urease, nesse processo, parte do nitrogênio é facilmente perdido para a atmosfera. Objetivou-se, com esta pesquisa, quantificar as perdas de amônia pela ureia e buscar fontes de fertilizantes nitrogenados com melhor aproveitamento. Foi utilizado o delineamento em blocos casualizados, com 11 tratamentos e três repetições. Foram avaliados os fertilizantes estabilizados ureia + cobre + boro, ureia + polímero aniônico e ureia + NBPT; fertilizantes convencionais: ureia, ureia dissolvida em água, sulfato de amônio, nitrato de amônio. Outro grupo de fertilizantes testados, foram os de liberação lenta ou controlada: ureia + enxofre + polímero, ureia + resina plástica, ureia formaldeído e ureia revestida por polímero insolúvel em água. Para todos os tratamentos, foram aplicados 300 kg ha⁻¹ de N/ano, e os fertilizantes convencionais e estabilizados foram divididos em três parcelamentos e os de liberação lenta ou controlada somente uma aplicação. Foram avaliadas as perdas por volatilização, alteração do pH na camada superficial do solo, teores de N, S, Cu e B na folha e produtividade do cafeeiro. Durante a safra 2016/2017, as maiores perdas de NH₃ foram observadas para a ureia + polímeros aniônicos (30,6%) e ureia convencional (25,6 %). A menor perda de nitrogênio por volatilização foi encontrada para o nitrato de amônio (0,5 %), sulfato de amônio (0,6 %) e ureia formaldeído (0,3 %). Não houve alteração do pH, na camada superficial (5 cm) do solo, após as aplicações das adubações nitrogenadas. Os maiores teores foliares de N foram observados para os fertilizantes que tiveram as menores perdas de amônia: nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído. Oito fertilizantes possibilitaram produtividade entre 60,5 e 69,2 sacas ha⁻¹ e as menores produtividades foram observadas para o nitrato de amônio, ureia formaldeído e ureia + cobre + boro (46,8 a 53,5 sacas ha⁻¹). Não foi observado incremento de produtividade para os fertilizantes que apresentaram as menores perdas de N por volatilização. Copilando os dados de pesquisas de autores que trabalharam, na mesma área experimental, em safras anteriores, em média de quatro safras, a maior perda foi observada para a ureia + polímeros aniônicos (33,0% do aplicado), seguida da ureia convencional com 29,5% de perdas. A menor perda foi para o nitrato de amônio (0,4%), sulfato de amônio (0,6%) e ureia formaldeído (0,7%). A produtividade média do experimento, em quatro safras, foi de 37 sacas beneficiadas ha⁻¹, apresentaram as maiores médias a ureia + polímeros aniônicos (42), ureia + resina plástica (41), sulfato de amônio (41) ureia dissolvida (39), ureia convencional (38), ureia + NBPT (37) e ureia + enxofre + polímero (37).

Palavras-chave: Perdas de amônia. Inibidor de urease. Ureia.

ABSTRACT

Urea is the most used source of nitrogen fertilizer used in coffee crops. When applied to soils, it comes into contact with water and suffers a hydrolysis reaction catalyzed by the urease enzyme. During this process, part of the nitrogen is lost to the atmosphere. We conducted this research with the objective of quantifying the loss of ammonium through urea and seeking more efficient nitrogen fertilizers to evaluate stabilized nitrogen fertilizers of slow and controlled release, comparing them to conventional fertilizers used in coffee crops. The study was conducted in Lavras, Minas Gerais state, Brazil. We used a completely randomized block design, with 11 treatments and three replicates. The stabilized and conventional fertilizers evaluated were: conventional urea, urea dissolved in water, ammonium sulfate, ammonium nitrate, urea + copper + boron, urea + anionic polymer, and urea + NBPT. Another group of fertilizers with slow or controlled release technology was also evaluated: urea + sulfur + polymer, urea + plastic resin, formaldehyde urea, and urea coated with a water-insoluble polymer. We applied 300 kg ha⁻¹ of N/year for all treatments, dividing the conventional and stabilized fertilizers into three plots, and the slow or controlled release fertilizers in a single application. We evaluated the loss by volatilization, pH change in the surface layer of the soil, the contents of N, S, Cu, and B in the leaves as well as coffee productivity. In the 2016/2017 harvest, the highest losses of NH₃ occurred for urea + anionic polymer (30.6%) and conventional urea (25.6%). The lowest loss of nitrogen by volatilization occurred for ammonium nitrate (0.5%), ammonium sulfate (0.6%), and formaldehyde urea (0.3%). The pH of the surface layer of the soil did not alter after applying the nitrogen fertilizers. The highest foliar contents of N occurred for the fertilizers presenting the lowest losses of ammonium: ammonium nitrate, ammonium sulfate, and formaldehyde urea. Eight of the fertilizers allowed productivity between 60.5 and 69.2 bags ha⁻¹. The lowest productivities occurred for ammonium nitrate, formaldehyde urea, and urea + copper + boron (from 46.8 to 53.5 bags ha⁻¹). We observed no increase of productivity for the fertilizers presenting the lowest losses of N by volatilization. When compiling research data obtained by authors who previously worked in the same experimental area for four harvests, we observed a higher loss for urea + anionic polymer (33.0%), followed by conventional urea (29.5% of loss). The lowest losses occurred for ammonium nitrate (0.4%), ammonium sulfate (0.6%), and formaldehyde urea (0.7%). The average productivity of the experiment in four harvests was of 37 bags ha⁻¹. The fertilizers with the highest average were urea + anionic polymer (42), urea + plastic resin (41), ammonium sulfate (41), dissolved urea (39), conventional urea (38), urea + NBPT (37), and urea + sulfur + polymer (37).

Keywords: Ammonium losses. Urease inhibitor. Urea.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: esquema da câmara coletora de amônia e seus componentes.	24
Figura 2: Precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar, em lavoura de cafeeiro, após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.	26
Figura 3: Perdas de N-NH ₃ acumuladas (A), volatilização diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a primeira adubação nitrogenada do cafeeiro.	29
Figura 4: Perdas de N-NH ₃ acumuladas (A), volatilização diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a segunda adubação nitrogenada do cafeeiro.	31
Figura 5: Perdas de N-NH ₃ acumuladas (A), volatilização diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a terceira adubação nitrogenada do cafeeiro.	34
Figura 6: Perdas de N-NH ₃ diárias ocorridas em lavoura de cafeeiro após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.	38
Figura 7: Perdas de N-NH ₃ acumuladas ocorridas em lavoura de cafeeiro após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.	39
Figura 8: Precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar em lavoura de cafeeiro após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização da área experimental na camada de 0-20 cm de profundidade, em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, antes das aplicações dos tratamentos estudados.	20
Tabela 2: Fertilizantes nitrogenados avaliados no experimento, seus respectivos teores de N e o número de aplicações de acordo com recomendação do fabricante.	22
Tabela 3: Perdas acumuladas de amônia (% do nitrogênio aplicado) para os fertilizantes convencionais e estabilizados em três adubações no cafeeiro.	35
Tabela 4: Perdas acumuladas de amônia para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada aplicados em único parcelamento.	41
Tabela 5: Perdas acumuladas de amônia para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada, estabilizados e convencionais na cultura do cafeeiro.	42
Tabela 6: Avaliação da variabilidade do pH do solo, na camada de 0 a 5 cm, influenciada por três adubações de fertilizantes nitrogenados no cafeeiro.	44
Tabela 7: Teor de nitrogênio foliar (g kg^{-1}) durante a condução do experimento.	46
Tabela 8: Teor de Enxofre foliar (g kg^{-1}) 60 dias após as três adubações nitrogenadas.	48
Tabela 9: Teor de Boro foliar (mg kg^{-1}) durante a condução do experimento.	50
Tabela 10: Teor de Cobre foliar (mg kg^{-1}) durante a condução do experimento.	51
Tabela 11: Produtividade do cafeeiro (sacas de 60 kg ha^{-1}) submetido a diferentes fertilizantes nitrogenados.	52
Tabela 12: Relação entre a produtividade e a quantidade de nitrogênio efetivamente utilizado pela cultura para produzir 60 kg de café beneficiado.	54
Tabela 13: Perdas acumuladas de amônia (% do aplicado), para fertilizantes de liberação lenta ou controlada, estabilizados e convencionais aplicados na cultura do cafeeiro de 2013 a 2017.	57
Tabela 14: Produtividade em quatro safras (sacas de 60 kg ha^{-1}) de cafeeiro submetido a diferentes fertilizantes nitrogenados.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Adubação nitrogenada para a cultura do cafeeiro	13
2.2	Fertilizantes nitrogenados	13
2.3	Eficiência dos fertilizantes nitrogenados	14
2.4	Volatilização de amônia	15
2.5	Fertilizantes estabilizados e de liberação lenta ou controlada	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Caracterização da área experimental	20
3.2	Delineamento experimental	21
3.3	Características dos fertilizantes	21
3.4	Tratos culturais	23
3.5	Dose de nitrogênio e aplicação dos tratamentos	23
3.6	Avaliações	24
3.6.1	Perdas de nitrogênio por volatilização	24
3.6.2	Produtividade	25
3.6.3	Teores de N, S, Cu e B na folha	25
3.6.4	pH superficial do solo	26
3.7	Condições climáticas	26
3.8	Análises estatísticas	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia	28
4.2	pH DO SOLO	44
4.3	Teores de N, S, Ca e B na folha	45
4.4	Produtividade	51
4.5	Resultados obtidos no experimento de 2013 a 2017 - Dados compilados de Dominghetti (2016) e Freitas (2017)	55
5	CONCLUSÕES	60
6	CONSIDERAÇÕES GERAIS	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira é uma das mais representativas do mundo, garante o abastecimento de alimento interno e o de diversos outros países. O setor agrícola necessita, a cada dia, ser mais eficiente, produzindo mais em menor área, não degradando o meio ambiente e garantindo renda para os envolvidos no setor. Uma das principais formas de se alcançar altas produtividades é por meio do manejo da fertilidade do solo com a adição de fertilizantes. Os mais aplicados, na agricultura, são os fertilizantes nitrogenados pela grande demanda do nutriente pelas culturas.

A ureia é o fertilizante nitrogenado mais consumido na agricultura brasileira (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, 2017). No entanto a ureia não é a fonte de N mais eficiente quando aplicada ao solo. Após a reação de hidrólise, há elevação do pH próximo aos grânulos, fazendo com que haja transformação do NH_4^+ (forma líquida), para NH_3 (forma gasosa), que perde para a atmosfera (TRENKEL et al., 2010). Diferentes manejos do solo e condições ambientais são responsáveis por aumentar ou diminuir as perdas por volatilização (SANGOI et al., 2003).

As perdas de nitrogênio na agricultura podem chegar de 1 até 60% do nitrogênio aplicado, variando conforme o ambiente e condições climáticas no momento da adubação (COSTA, VITTI, CANTARELLA 2003; CANTARELLA et al., 2008). Em pesquisa com a cultura do café, alguns autores encontraram perdas de mais de 30% do nitrogênio aplicado em três adubações (DOMINGHETTI et al, 2016; CHAGAS et al., 2016; FREITAS, 2017).

No intuito de reduzir as perdas dos fertilizantes nitrogenados aplicados na agricultura, foram desenvolvidos fertilizantes com algum aditivo capaz de reduzir as perdas para o ambiente. Dentre as tecnologias, destacam-se os fertilizantes estabilizados e de liberação lenta ou controlada, que possuem agentes químicos, biológicos ou físicos, os quais resultam em melhor aproveitamento efetivo do nutriente aplicado, garantindo uma melhor nutrição para as plantas e uso racional de fertilizantes (TRENKEL, 2010).

Os fertilizantes estabilizados são aqueles que possuem algum tipo de aditivo, fazem com que o nitrogênio permaneça por um período maior na forma em que foi aplicado. Em condições naturais, eles podem ser transformados em outra forma susceptível a perdas, como a amônia, por exemplo. Fertilizantes de liberação lenta ou controlada possuem uma proteção física nos grânulos a qual impede a entrada de água. Com isso, a dissolução da ureia e da hidrólise são retardadas, disponibilizando o nitrogênio de maneira lenta e gradual para as plantas, assim, o

elemento permanece menos tempo exposto ao ambiente, havendo redução nas perdas (TRENKEL, 2010).

Diante exposto, a presente pesquisa foi realizada com o objetivo de avaliar o aproveitamento efetivo do N aplicado de fertilizantes nitrogenados estabilizados e de liberação lenta ou controlada em comparação com fertilizantes convencionais usados na cafeicultura, por quantificação da volatilização de amônia e produtividade da cultura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Adubação nitrogenada para a cultura do cafeeiro

O nitrogênio está presente nas principais reações bioquímicas em plantas e microorganismos, os quais fazem com que este seja o elemento requerido em maiores quantidades pelas culturas (CANTARELLA, 2007). O nutriente está presente nos Nucleosídeos fosfatos, nos aminoácidos que compõem a estrutura dos ácidos nucleicos e das proteínas, compõe a molécula de clorofila. Somente os elementos oxigênio, carbono e hidrogênio são encontrados em maiores proporções nas plantas que o nitrogênio (TAIZ e ZEIGER, 2006; FAQUIN, 2005). Por sua grande importância, a deficiência de N causa sérios danos ao desenvolvimento das plantas de cafeeiro (MALAVOLTA, 2006).

Grande parte das reservas de nitrogênio no solo está na forma orgânica, mostrando a importância da Matéria Orgânica na fertilidade do solo. O N presente nos compostos orgânicos pode se encontrar de forma lábil, de ciclagem rápida ou de moléculas bastante humificadas e recalcitrantes. Reações de mineralização transformam o nitrogênio orgânico em formas disponíveis para as plantas, variando de acordo com o tipo de solo e manejo (CANTARELLA, 2007).

Os teores foliares de N para o cafeeiro é de 3,0% a 3,5%, em caso de excesso do nutriente, há um desequilíbrio com o K, sendo uma boa relação de N-K é de 2 a 3:1 (MALAVOLTA, 1992). Em caso de excesso de adubação nitrogenada, as plantas de cafeeiro passam a vegetar muito e produzir pouco (GALLO et al., 1999).

Para as adubações nitrogenadas na cultura do cafeeiro, como não é usual analisar a quantidade de N disponível no solo, o cálculo da adubação é realizado mediante a produtividade esperada da safra atual somada à safra do ano seguinte e com base nos teores de N na folha, podendo a quantidade aplicada variar de 250 a 500 kg ha⁻¹, conforme a região e o potencial produtivo da lavoura (GUIMARÃES et al., 1999).

2.2 Fertilizantes nitrogenados

A ureia é o fertilizante mais consumido no Brasil, representando cerca de 60 % dos fertilizantes nitrogenados. Estima-se que, em 2016, tenham sido consumidas 5,60 Mt do produto, sendo 4,60 Mt importadas e apenas 1,0 Mt produzida no país (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, 2017). Possui cerca de 45 % de N, sua alta concentrações

do nutriente, proporciona economia com transporte e armazenamento, e maior rendimento na aplicação pelo menor volume aplicado (ZAVASCHI et al., 2014).

Outra fonte de nitrogênio utilizada na agricultura brasileira é o Sulfato de Amônio, o segundo mais consumido no Brasil, 2,05 Mt em 2016, (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, 2017). Apresenta em torno de 21% de N e 24% de Enxofre, baixa higroscopicidade, estabilidade química e boa granulometria. Uma desvantagem em sua utilização, é que possui reação no solo fortemente ácida, reduzindo significativamente o pH do meio. Outra desvantagem é sua baixa concentração de nitrogênio, fazendo com que o preço do nutriente fique mais elevado (BYRNES, 2000).

O nitrato de amônio (NO_3^-) é outra fonte bastante utilizada na agricultura, 1,40 Mt foram consumidas, em 2016, no país (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, 2017). Possui cerca de 33% de nitrogênio, é uma fonte nitrogenada com alta eficiência agrônômica, exceto em condições de solo que propiciam a lixiviação, como em solos arenosos por exemplo (SOUZA et al., 2017). Existem restrições quanto à sua fabricação, estocagem e transporte pela possibilidade da sua utilização como explosivos (RAIJ, 1991).

2.3 Eficiência dos fertilizantes nitrogenados

Durante a hidrólise da ureia, catalisada pela enzima urease, ocorre a elevação do pH próximo ao grânulo. A elevação do pH advém da formação de íons de bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) favorecendo a transformação de N-NH_4^+ em N-NH_3 que é um gás, sendo facilmente perdido para a atmosfera (CANCELLIER, 2013; VITTI et al., 2002). As perdas de N podem ser influenciadas por vários fatores, destacando-se o clima, pH do solo, teor de matéria orgânica, entre outros.

É difícil a predição da quantidade exata a ser perdida para a atmosfera, não havendo um fator de correção para incrementar a dose do fertilizante no momento da fertilização, utilizando a ureia como fonte. Entretanto, muitos pesquisadores vêm estudando a volatilização da amônia, citando perdas de 17 a 60% dependendo do ambiente e condições climáticas em que se aplica o fertilizante (CANTARELLA et al., 2008). Outros pesquisadores, Costa, Vitti e Cantarella (2003) em um estudo com cana de açúcar, aplicando o fertilizante sobre a palhada da cultura, encontraram perdas acumuladas de 35 a 36% e atribuíram as perdas obtidas à matéria orgânica presente que favoreceu a atividade da urease. Cantarella et al. (2008) encontraram perdas de amônia de até 78%, Cancellier et al. (2013) 31% de perda, Souza (2017) 20,6%, Chagas et al. (2016) relataram volatilização da amônia de até 31% para ureia convencional em cafeeiro

irrigado no sul de Minas Gerais. Outros autores encontraram perdas de N-NH₃ de até 94% (OLIVEIRA et al., 1997 e CANTARELLA et al., 1999).

Segundo Cancellier et al. (2013) o nitrogênio está sujeito a diversas perdas no ambiente, por sua dinâmica complexa e pelas transformações que ocorrem no solo. Pode ser perdido por lixiviação na forma de nitrato (NO₃), por volatilização na forma de amônia (NH₃) e por desnitrificação causado por microorganismos que leva a perdas de N na forma de NO, N₂O e N₂. Em razão dos fatores citados, estima-se que o aproveitamento do fertilizante nitrogenado aplicado não passa de 50%; quanto maior as doses de N aplicado, as perdas serão proporcionalmente mais elevadas (LADHA et al., 2005).

Dentre os principais fatores que influenciam a perda do nitrogênio para a atmosfera, destacam-se o pH do solo, temperaturas muito elevadas, menor umidade do solo, precipitação após a aplicação do fertilizante, menor capacidade de troca de cátions (CTC), quantidade de matéria orgânica ou cobertura vegetal potencializando a atividade da urease (TASCA et al., 2011 e SANGOI et al., 2003).

Nas lavouras cafeeiras, as principais perdas de N ocorrem pelo pH elevado na camada superficial do solo, pois, o corretivo aplicado não é incorporado. Também há perdas promovidas pela quantidade de resíduos da colheita, principalmente folhas e galhos, que ficam espalhados no local de adubação, favorecendo a atividade da urease.

Uma forma de reduzir a volatilização de N da ureia seria enterrar o fertilizante, promovendo o maior contato do mesmo com a CTC do solo (ROCHETTE et al., 2013). Neste local de aplicação, há maior difusão promovida pela solução do solo e, o pH próximo ao grânulo se equilibra com o meio. Em solos argilosos as perdas são menores, pois possuem CTC mais elevada proporcionando maior retenção do amônio. No entanto, enterrar o fertilizante se torna uma atividade onerosa e inviável.

2.4 Volatilização de amônia

A urease, enzima extracelular responsável por catalisar a reação de hidrólise da ureia, transforma o N presente na ureia ((NH₂)₂CO) em N-NH₃ (amônia), que é um gás e é facilmente perdido para a atmosfera (CANTARELLA, 2007). Segundo Cancellier (2013), o N também pode ser perdido por volatilização por meio de outras formas químicas, como N₂, NO e N₂O, no entanto, no Brasil, predominam as perdas na forma de amônia.

Os solos brasileiros são caracterizados por serem ácidos, o que, de certa forma, contribui para que haja menos perdas de N por volatilização de fertilizantes amoniacais. Conforme citado

anteriormente, um dos fatores que potencializam a volatilização do N na forma amoniacal (N-NH_3) é o pH elevado próximo ao grânulo de ureia (TASCA et al., 2011).

As perdas de nitrogênio na agricultura são citadas na literatura de forma contrastante entre os pesquisadores; segundo Tasca et al. (2011) perdas acima de 70% não costumam ocorrer. Cantarella et al. (2008) citam que as perdas variam de 17 a 60% dependendo das condições ambientais em que o fertilizante fora aplicado.

Outros estudos apresentam perdas de 15 a 22% (SCIVITTARO, 2010), Freitas, (2017) encontrou volatilização de 22,98% do aplicado em três adubações na cultura do café, Rodrigues (2016) observou perdas de 8,2% em cafeeiro conilon. Avaliando adubação nitrogenada em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, Contin, (2007) observou perdas de 16% para a ureia convencional. Avaliando por duas safras (2014 e 2015) a adubação nitrogenada em superfície no cafeeiro dividido em três parcelamentos, Dominghetti (2016) encontrou perda média de 34,8% para a ureia convencional. Cancellier, (2013) trabalhando com adubação nitrogenada em cobertura no milho, observou perda acumulada no período avaliado de 31,2% do aplicado.

Segundo Lara Cabezas et al. (2004) as maiores perdas ocorrem até o quinto dia após a adubação nitrogenada, Souza et al. (2017) observou que as maiores perdas ocorreram até o 4º dia. Havendo umidade suficiente, a hidrólise da ureia ocorre logo após a aplicação (COSTA, VITTI e CANTARELLA, 2003; LARA CABEZAS et al., 2004). Cancellier (2013) observou que 12% das perdas ocorreram até o segundo dia e que próximo do 6º dia, 100% das perdas já haviam ocorrido. Avaliando a volatilização de amônia no cafeeiro, em Lavras – MG, Freitas (2017) observou que mais de 80% das perdas ocorreram até 5 dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados no cafeeiro.

2.5 Fertilizantes estabilizados e de liberação lenta ou controlada

Com o objetivo de reduzir as perdas dos fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura, os fertilizantes estabilizados e de liberação lenta ou controlada possuem agentes químicos, biológicos ou físicos, que resulta em melhor aproveitamento efetivo do nutriente aplicado, garantindo uma melhor nutrição para as plantas e otimização do uso de fertilizantes. Fertilizantes estabilizados são os que possuem algum tipo de aditivo, fazendo com que o fertilizante permaneça por mais tempo na forma em que foi aplicado, impedindo a transformação do nitrogênio para alguma forma susceptível a perdas (TRENKEL, 2010, NAZ e SULAIMAN, 2016).

Um grupo de fertilizantes estabilizados são os que diminuem a taxa de nitrificação por reduzir a atividade de bactérias do grupo *Nitrossomonas*, impedindo a transformação de amônia em nitrito (NO_2^-), preservando o N na forma amoniacal que é menos susceptível a perdas por lixiviação (CANTARELLA, 2007). Dentre os inibidores da nitrificação, destacam-se o Nitrapyrin, dicianodiamida (DCD), fosfato de 3,4-dimetilpirazole (DMPP), Triazol, 3-MP- e 2-amino-4-chloro-6-methyl-pyrimidine (TRENKEL, 2010).

Outro grupo de fertilizantes estabilizados são os que reduzem a atividade da enzima urease. Esta enzima pertence a um grupo que ocorre em abundância na natureza, pode ser encontrada em animais, plantas, fungos, bactérias e algas. A função da urease é catalisar a reação de hidrólise da ureia. A enzima presente no solo é advinda de restos de vegetais e células microbianas (KRAJEWSKA, 2009). Sendo assim, adubação com ureia sobre restos de culturas, como folhas e galhos, que promovem maior teor de matéria orgânica, a atividade da enzima urease é maior, potencializando a reação de hidrólise da ureia e conseqüentemente, suas perdas por volatilização da amônia.

Um agente inibidor da atividade da urease é o NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida, podendo reduzir a volatilização do nitrogênio em até 88 % (SCIVITTARO et al., 2010). Quando aplicado ao solo, o NBPT se decompõe rapidamente em seu análogo de oxigênio, passando para a forma de NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), inativando a enzima urease pela substituição das moléculas de água por átomos de Níquel (CANCELIER et al., 2013; CANTARELLA et al., 2008; SCIVITTARO et al., 2010; KRAJEWSKA, 2009; TASCA et al., 2011; TRENKEL, 2010; RODRIGUES et al., 2016).

Além do NBPT, outros meios de impedir a catalisação da urease é a adição de íons metálicos à ureia. Dentre eles se destacam o cobre (Cu), molibdênio (Mo), cobalto (Co), zinco (Zn), manganês (Mn), prata (Ag), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg); esses íons reagem com o grupo sulfidril, bloqueando o sítio ativo da enzima (ADOTEY et al., 2017; KRAJEWSKA, 2009). É mais viável a utilização de elementos capazes de inibir a atividade da urease e que também são nutrientes essenciais às plantas, assim, o próprio inibidor é absorvido pelas plantas e utilizado no seu metabolismo sem deixar resíduo no solo (SILVA, 2016).

Outro inibidor de urease bem conhecido é o ácido bórico (H_3BO_3), por possuir uma estrutura muito semelhante à da ureia, funciona como um substrato análogo. O ácido bórico substitui quase que perfeitamente as moléculas de água ligadas ao níquel do centro da reação (HERINGER et al., 2008; BENINI et al., 2004).

A adição de cobre e boro à ureia além de servir como nutrientes às plantas é eficiente na redução da atividade da urease (HERINGER et al., 2008), podendo chegar à redução de perdas em até 54% (STAFANATO et al., 2013).

Fertilizantes de liberação lenta ou controlada são aqueles que de alguma forma retardam a disponibilidade do nutriente para as plantas, ficando menos tempo exposto ao ambiente, quando comparado com outros fertilizantes convencionais. Fertilizantes de liberação lenta são diferentes de fertilizantes de liberação controlada, pois seus mecanismos e princípios de ação são distintos.

Os fertilizantes de liberação lenta são quimicamente modificados, um dos mais utilizados é a ureia formaldeído (SOUZA et al., 2017). Esta forma de fertilizante nitrogenada, é originado da reação entre a ureia e o formaldeído em um reator sob condições controladas, formando uma grande cadeia de átomos de N e C. Para a liberação do N presente na molécula, é necessário, principalmente, a ação de microorganismos, exposição à umidade e temperatura (AZEEM, et al., 2014; TIMILSENA, et al., 2014; YAMAMOTO, et al., 2016).

Não existe uma distinção oficial de fertilizantes de liberação lenta dos de liberação controlada, entretanto, os de liberação lenta possuem o diferencial de prolongar por mais tempo a disponibilização do elemento (NASCIMENTO et al., 2013). A velocidade de liberação do nutriente é definida pela degradação química e biológica promovida no ambiente que o grânulo de ureia está exposto. Como principais fertilizantes de liberação lenta podem ser citados a ureia formaldeído, isobutilaldeído e crotonaldeído (ZAVASHI, 2010).

Os fertilizantes de liberação controlada, ao contrário dos de liberação lenta, têm a disponibilização do nutriente conhecida, devido à espessura da camada que envolve o grânulo de ureia. Boa parte dos fertilizantes de liberação controlada disponíveis no mercado são os revestidos por enxofre e polímeros, e a disponibilização do nutriente para o ambiente depende da espessura e da qualidade do revestimento do grânulo (TRENKEL, 2010).

Nos fertilizantes recobertos com enxofre, a película protetora impede o contato direto do grânulo de ureia com a água, impedindo sua solubilização. Caso a proteção do grânulo seja de baixa qualidade, ou seja, se houver presença de microfissuras na camada protetora permitindo a entrada da água, o nutriente presente no grânulo é rapidamente solubilizado, aumentando a possibilidade de perdas do elemento para o ambiente (CANCELLIER, 2013). A disponibilização do nutriente dos fertilizantes de liberação controlada se dá por meio da exposição do grânulo a agentes intemperizantes, como água, temperatura, agentes químicos e impactos mecânicos, possibilitando o rompimento da película protetora.

A disponibilização de nutriente mais eficiente do ponto de vista agrônomo seria de forma sigmoïdal, atendendo as épocas de maiores demandas das principais culturas, e reduzindo perdas por lixiviação e volatilização (TRENKEL, 2010). Alguns autores chamam os fertilizantes de liberação controlada de liberação gradual ou gradativa, (GOMES et al., 2011; QUEIROZ et al., 2011), além disso, algumas empresas que comercializam este tipo de produto ousam chamá-los, como forma de marketing, de fertilizantes inteligentes.

Em consequência da disponibilidade do nutriente ser lenta e constante, os fertilizantes de alta eficiência podem ser aplicados sem parcelamentos, enquanto os convencionais devem ser parcelados de três a quatro vezes. A necessidade de mão de obra para execução dos tratamentos culturais é um dos principais fatores que elevam os custos da cafeicultura, principalmente em regiões com pouca disponibilidade de trabalhadores no campo. Dominghetti, et al. (2016) relatam as vantagens e o custo benefício da utilização desses fertilizantes permitindo redução do trabalho nas lavouras.

Outro fator que contribui para o sucesso destas tecnologias, é a má distribuição das chuvas, que nos últimos anos vêm ocorrendo com mais frequência (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007). As recomendações de fertilizantes pelos técnicos de campo e a compra do adubo pelos produtores, normalmente, aproveitando a época de melhores preços, acontece antes de iniciar o período chuvoso, por volta de julho e agosto. Sem a previsão de como será a distribuição de chuvas no ano agrícola, é necessária a garantia de um produto que se estabeleça bem em condições adversas de clima.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras-MG, no Campo Experimental do Departamento de Agricultura (DAG), setor de cafeicultura, localizada na latitude 21° 14' 06'' Sul e longitude de 45° 00' 00'' Oeste. Segundo classificação de Köppen, o clima é do tipo Cwa, mesotérmico com verões brandos e suaves e período seco no inverno.

A precipitação média anual é em torno de 1472,3 mm e temperatura média anual de 19,4°C. A Evapotranspiração Potencial (ETP) é em torno de 899 a 873 mm por ano (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

A lavoura está localizada a uma altitude de 910 m em um solo classificado como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (EMBRAPA, 2013). As propriedades químicas e textura do solo, antes da implantação do experimento seguem de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização química e textura do solo da área experimental na camada de 0-20 cm, antes da aplicação dos tratamentos.

Atributos	Unidade	Teores
pH	-	4,60
K	mg dm ⁻³	92,09
P	mg dm ⁻³	16,06
Ca	cmol _c dm ⁻³	1,74
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,41
Al	cmol _c dm ⁻³	0,70
V	cmol _c dm ⁻³	30,05
MO	dag kg ⁻¹	2,43
Cu	mg dm ⁻³	1,54
B	mg dm ⁻³	0,25
*Areia	%	18
*Silte	%	24
*Argila	%	58

*Adaptado Dominghetti et al. (2016)

Do autor: pH em água – proporção 1:2; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ = extrator de KCl (1 mol/L); T = Capacidade de Troca de Cátions (CTC) a pH 7; P, K e Cu = Extrator Mehlich-1; B = extrator água quente; a textura do solo (areia, silte e argila) foi determinada pelo método de Bouyoucos.

O experimento foi instalado em setembro de 2016, em uma lavoura da cultivar Catuaí Vermelho, linhagem 144 do Instituto Agrônomo de Campinas. A lavoura foi plantada em

2010, em espaçamento de 3,7 m na entrelinha e 0,7 m entre plantas, totalizando 3.861 plantas ha⁻¹.

3.2 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em delineamento em blocos ao acaso, contendo 11 tratamentos e 3 repetições. Cada parcela experimental continha 10 metros de comprimento e um total de 14 plantas, sendo utilizadas para avaliações somente as 10 plantas centrais. As parcelas foram delineadas, ao longo da linha de plantio, onde foi adotado o sistema de bordadura dupla entre as linhas úteis do experimento.

3.3 Características dos fertilizantes

No presente estudo, avaliaram-se fertilizantes nitrogenados de diferentes tipos de tecnologias, cujas características estão descritas a seguir:

Ureia: foi utilizado o fertilizante convencional, granulada com 45% de N.

Ureia dissolvida em água: usou-se a mesma ureia convencional descrita acima, no entanto ela foi aplicada solubilizada em água na proporção de 50 g de ureia para um litro de água.

Sulfato de amônio: fórmula química (NH₄)₂SO₄, fertilizante de reação ácida, possui 19% de nitrogênio e 21% de enxofre (331,6 kg ha⁻¹ de S).

Nitrato de amônio: fórmula química (NH₄)NO₃, apresenta 31% de N.

Ureia + cobre + boro: contém 44% de N na sua composição, 0,15 % de cobre na forma de sulfato de cobre (1,02 kg ha⁻¹ de Cu) e 0,4 % de boro na forma de ácido bórico (2,73 kg ha⁻¹ de B).

Ureia + polímero aniônico: apresenta 41% de nitrogênio, é um fertilizante de liberação do N estabilizada. É um polímero solúvel em água, pertence a um grupo de fertilizantes que inibem a nitrificação, possui cargas negativas que retêm o NH₄⁺.

Ureia+ Enxofre + Polímero: o enxofre presente está na forma elementar (S⁰), os grânulos de ureia são recobertos por uma camada de S⁰, na proporção de 9,73% (74,8 kg ha⁻¹ de S⁰) e por 0,78% de polímeros orgânicos (6,0 kg ha⁻¹) que dificultam a penetração da água.

Ureia + NBPT: a ureia convencional, com 45 % de N, é recoberta por um inibidor de urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT).

Ureia + Resina plástica: apresenta concentração de 44 % de N, uma resina protege os grânulos de ureia, impedindo o contato direto com a água, a liberação do N é controlada pela degradação resina na medida em que é exposta à temperatura e umidade do solo.

Ureia formaldeído: 26 % de N, o fertilizante é uma reação entre moléculas de formaldeído (H_2CO) com grandes quantidades de ureia, em condições específicas, gera uma cadeia de ureias metiladas de diferentes tamanhos, o nutriente é disponibilizado ao solo pela ação de microorganismos que decompõem a cadeia.

Ureia revestida por polímero insolúvel: apresenta 40% de N, a ureia é recoberta por uma camada de polímero que não é solubilizado em água, o que torna um fertilizante de liberação controlada à medida que a proteção é degradada.

As características de cada fertilizantes e o parcelamento de aplicação estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Fertilizantes nitrogenados avaliados no experimento, seus respectivos teores de N e o número de aplicações de acordo com recomendação do fabricante.

Tratamentos	N %	N -----	S -----	B -----	Cu -----	Número de Aplicações
1 - Ureia	45	300	0,0	0,0	0,0	3
2 - Ureia dissolvida em água	45	300	0,0	0,0	0,0	3
3 - Sulfato de amônio	19	300	331,6	0,0	0,0	3
4 - Nitrato de amônio	31	300	0,0	0,0	0,0	3
5 - Ureia + cobre + boro	44	300	0,0	2,7	1,0	3
6 - Ureia + polímero aniônico	41	300	0,0	0,0	0,0	3
7 - Ureia+ enxofre + polímero	39	300	74,8	0,0	0,0	1
8 - Ureia + resina	44	300	0,0	0,0	0,0	1
9 - Ureia + NBPT	45	300	0,0	0,0	0,0	3
10 - Ureia formaldeído	26	300	0,0	0,0	0,0	1
11 - Ureia revestida por polímero insolúvel	40	300	0,0	0,0	0,0	1

Nota: para todos os fertilizantes foram aplicados 300 kg de N ha⁻¹.

Fonte: Dados do autor (2018)

3.4 Tratos culturais

Foi realizada a calagem, calculada pelo método de saturação por bases do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), objetivando elevar o V% para 60%. Aplicaram-se 300 Kg de K_2O (KCl) e 100 Kg de P_2O_5 (Super Fosfato Simples), seguindo manual de recomendações de Guimarães et al. (1999). A aplicação de micronutriente foi feita via foliar juntamente com os defensivos, na proporção de 0,5% de $ZnSO_4$, 0,5% de $MnSO_4$, 0,5% de H_3BO_4 e 0,25% de $Cu(OH)_2$ do volume de calda (400 l ha^{-1})

Para controle das principais doenças da cultura, foram realizadas três aplicações anuais de Piraclostrobina + Epoxiconazol. Não houve necessidade de aplicação de inseticidas.

O controle de plantas daninhas foi realizado com capina manual próxima às câmaras de coleta e entre as plantas, nas entrelinhas foram feitas três roçadas e duas aplicações de Glyphosato (960 g ha^{-1}) + Carfentrazona etílica (40 g ha^{-1}) no ano agrícola.

Antes da colheita foi feita a “arruação” da lavoura, objetivando retirar toda impureza presente em baixo das plantas como folhas e galhos, para facilitar a colheita e possibilitar quantificar os frutos que caírem no chão no ato da colheita.

3.5 Dose de nitrogênio e aplicação dos tratamentos

Foi aplicado no experimento 300 kg ha^{-1} de N, segundo recomendação para adubação do cafeeiro de Guimarães et al. (1999), para vegetação e produção da cultura. A produtividade, para o cálculo da adubação nitrogenada, foi estimada entre a safra pendente, após a florada de 2016 + a safra esperada em 2017.

Para cada tratamento, foi aplicada a mesma quantidade de nitrogênio (300 kg ha^{-1}), variando a quantidade de produto comercial aplicado de acordo com a concentração de N de cada um.

Os fertilizantes convencionais (1, 2, 3 e 4), Ureia + cobre + boro (5), Ureia + polímero (6) e Ureia + NBPT (9), foram parcelados em três aplicações (Nov, Jan e Mar), (Tabela 2). Os fertilizantes de liberação lenta ou controlada (7, 8, 10 e 11) não foram parcelados, aplicando-se a dose total na primeira aplicação em novembro.

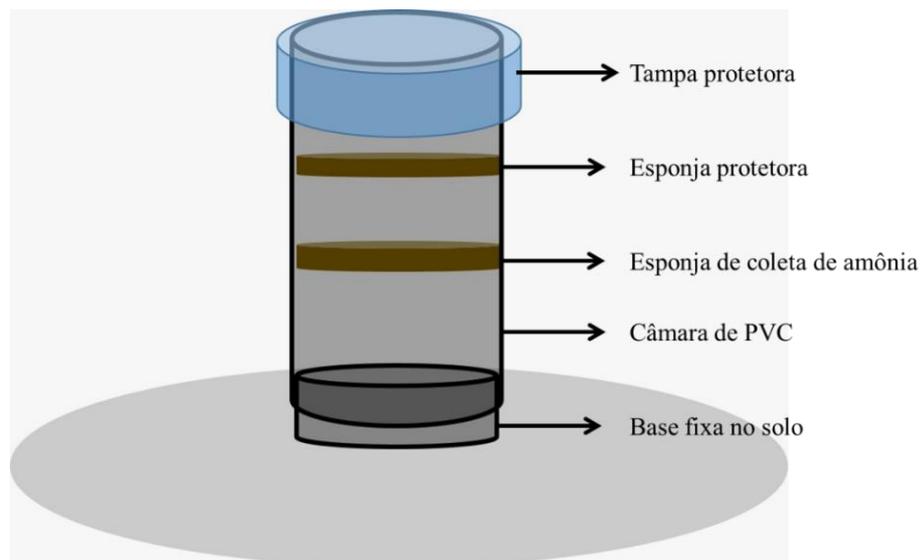
O tratamento ureia dissolvida em água (2) recebeu a mesma quantidade do fertilizante que a ureia convencional (1), porém diluída em água, na proporção de 50 g de ureia para um litro de água. A solução foi aplicada nas câmaras de coleta, bem como os demais tratamentos.

3.6 Avaliações

3.6.1 Perdas de nitrogênio por volatilização

Para quantificar a volatilização do nitrogênio na forma de amônia (NH_3), foi utilizado o método do coletor semiaberto (LARA CABEZAS, 1999). Foram utilizados tubos de PVC com 20 cm de diâmetro e 50 cm de altura. Os tubos de PVC foram acoplados a uma base de PVC de 10 cm, sendo 5 cm enterrados no solo (esquema na Figura 1), sob a projeção da copa das plantas, havendo três em cada unidade experimental. A aplicação do fertilizante foi realizada dentro destas bases, levando em consideração o cálculo para a área total e extrapolando para a área da base de PVC. O tubo de PVC possuía a superfície protegida deixando espaço para entrada de ar, conforme a Figura 1.

Figura 1- esquema da câmara coletora de amônia e seus componentes.



Fonte: dados do autor (2018)

Dentro de cada tubo de PVC, foram colocados dois discos de espuma laminada com $0,02 \text{ g cm}^{-3}$ de densidade e 2 cm de espessura cortados no mesmo diâmetro do tubo. Os discos foram posicionados dentro das câmaras a uma altura de 30 e 40 cm do solo. A esponja inferior foi embebida com 80 ml de uma solução de ácido fosfórico (H_3PO_4 ; 60 ml L^{-1}) e glicerina (50 ml L^{-1}), para reter a amônia volatilizada. A esponja superior teve a função de proteger contra possíveis contaminações do ambiente.

As esponjas inferiores, responsáveis pela retenção da amônia volatilizada, foram coletadas no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 6º, 8º, 10º, 13º, 16º, 20º, 24º, 28º e 32º dia após a aplicação dos fertilizantes nos tratamentos parcelados. Para os fertilizantes de uma única aplicação a coleta foi na mesma sequência após a adubação até os 32 dias e depois foram coletados uma vez por semana até 232 dias após a aplicação.

A solução contida na espuma foi extraída por meio de filtragem em Funil de Buchner e bomba de vácuo, sendo feitas cinco lavagens de 80 ml de água destilada. Uma alíquota era armazenada em câmara fria a 5°C, em seguida, foi feita a destilação da amostra pelo método Kjeldahl e determinação do teor de N.

Como garantia de que não houve nenhuma contaminação das amostras avaliadas, foram analisadas em todas as coletas três esponjas em branco, ou seja, que receberam somente a solução de ácido fosfórico + glicerina e não foram instaladas nas câmaras de coleta, servindo de controle no experimento. Caso estas estivessem apresentado algum teor de N, seria abatido dos tratamentos avaliados, garantindo que todo N presente na amostra fosse proveniente dos fertilizantes.

3.6.2 Produtividade

A colheita dos frutos foi feita manualmente sobre panos apropriados quando o maior percentual dos frutos estava no estágio “cereja”, dia 16 de junho de 2017, colhendo apenas as cinco plantas centrais na parcela. O volume colhido das cinco plantas foi mensurado e retirada uma amostra de cinco litros para secagem em terreiro até 11,5 % de umidade.

Após a secagem, a amostra de cinco litros foi beneficiada e pesada; com essa massa, foi feito a conversão do volume de frutos colhidos na parcela por kg de café beneficiado por planta e posteriormente a conversão em sacas de 60 kg por hectare.

3.6.3 Teores de N, S, Cu e B na folha

Foram amostradas folhas para análise, antes da implantação do experimento e logo após os 32º dia de coleta nas três adubações. Foram coletados 20 pares de folhas por parcela, do 3º ou 4º par de folhas, a partir do ápice dos ramos, no terço médio das plantas.

As folhas amostradas foram armazenadas, em sacos de papel identificados e levadas para o laboratório do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras,

onde foram lavadas com água destilada e secas em papel absorvente. Em seguida, as folhas foram encaminhadas para estufa com circulação forçada de ar na temperatura de 65° C e passadas em moinho do tipo Wiley com peneira de 1 mm de abertura. Para determinação do teor N na folha, seguiu-se a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995).

3.6.4 pH superficial do solo

Antes da aplicação dos tratamentos nos três parcelamentos da adubação, foram realizadas coletas de solo na camada de 0-5 cm de todas as parcelas para determinação do pH em água.

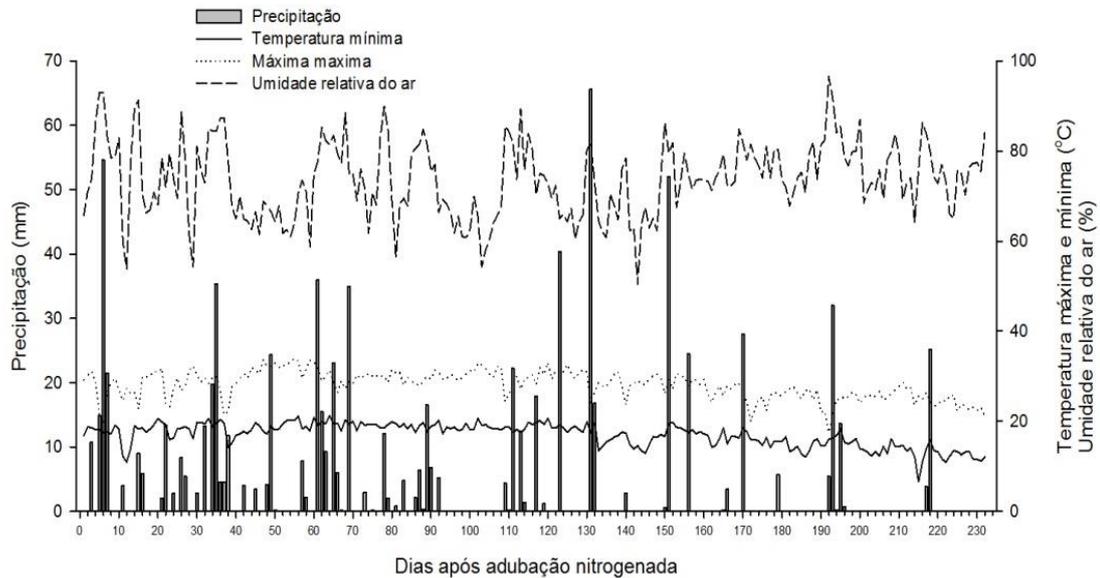
Foram coletadas 6 amostras por parcela experimental que, seguidamente, homogeneizaram-se em uma única amostra composta. O solo foi seco à sombra e peneirado em peneiras de 20 cm de diâmetro e malha de 2 mm, obtendo terra fina seca ao ar. Retirou-se uma amostra de 10 cm³ e adicionada a 25 ml de água destilada. Posteriormente a mistura foi agitada em agitador por 1 minuto. A amostra se manteve em repouso por aproximadamente 30 minutos, em seguida, foi feita a leitura do pH.

3.7 Condições climáticas

As condições meteorológicas, precipitação, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar, foram mensuradas diariamente durante 232 dias após a 1ª adubação nitrogenada (08/11/2016) por uma estação automática presente próxima à área experimental (Figura 2).

No período avaliado houve um total acumulado de 856,5 mm de chuva. A precipitação influenciou diretamente no aproveitamento dos fertilizantes, foi observada precipitação acima de 40mm entre 6, 69, 123, 131 e 151 dias após a adubação nitrogenada. Também houve no período alguns dias de estiagem, ficando mais de 10 dias sem precipitação: 93 a 108, 141 a 150, 157 a 165, 196 a 216, 219 a 232 dias, após a aplicação dos tratamentos.

Figura 2 - Precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar, em lavoura de cafeeiro, após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.



Fonte: Dados do autor (2018)

A temperatura máxima observada foi de 34,1°C e a mínima de 10,9°C, a temperatura média do período foi 22,6°C. A umidade relativa do ar média durante toda condução do experimento foi de 73,6%.

3.8 Análises estatísticas

Os dados encontrados foram submetidos à análise de variância pelo programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011), em que foi aplicado Skott Knott ($p < 0,05$) para o teste de médias e comparação dos tratamentos. As avaliações de teores de nutrientes na folha e pH superficial do solo foram analisadas em blocos com parcelas subdivididas no tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia

As perdas de N-NH₃ diária e acumulada, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar e precipitação, após 32 dias da 1^a, 2^a e 3^a adubação nitrogenada, estão apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 respectivamente, para os fertilizantes aplicados em três parcelamentos: ureia convencional, ureia dissolvida em água, sulfato de amônio, nitrato de amônio, ureia + cobre + boro, ureia + polímero e ureia + NBPT.

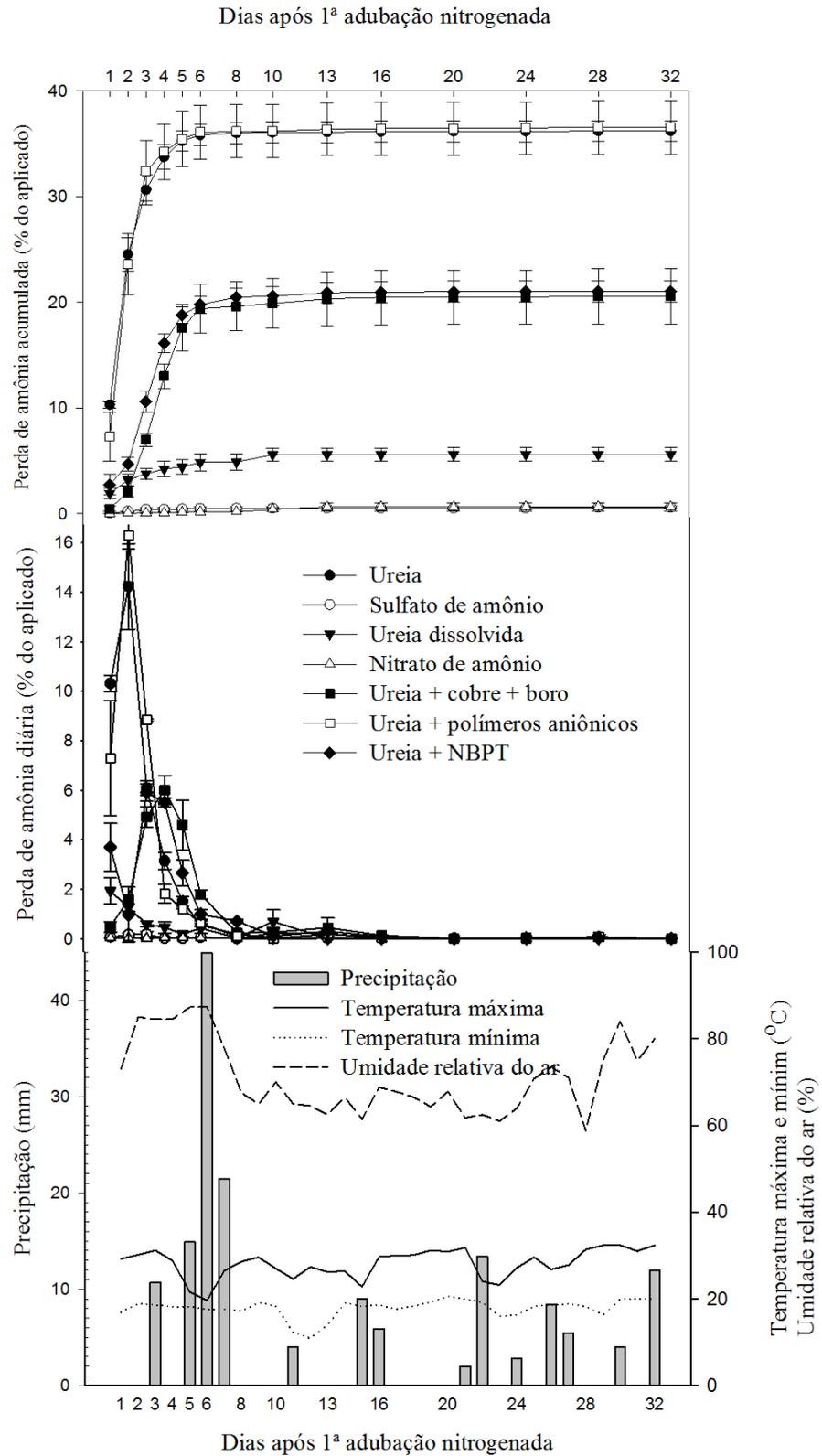
A volatilização diária está representada em porcentagem que foi volatilizado do total aplicado, sendo 100Kg em cada adubação. Quanto mais distantes os primeiros picos de volatilização forem do dia da primeira adubação, melhor é a eficiência do fertilizante nitrogenado.

Durante a 1^a adubação nitrogenada, as perdas de N-NH₃ acumuladas (Figura 3a) foram superiores para a ureia convencional (36,2%) e ureia + polímero aniônico (36,5%). Porém a perda máxima de N-NH₃ ocorreu até no 6^o dia após a aplicação. O pico máximo de volatilização ocorreu no segundo dia (Figura 4b), alcançando uma perda de 16% de N-NH₃.

Observando a Figura 3c, houve precipitação pluviométrica de 10 mm apenas no 3^o dia após a fertilização, cerca de 10 mm, antes disso o solo estava com pouca umidade, observando volatilização logo no 1^o e 2^o dias. Foram quantificadas perdas diárias de 2 a 6% até o sexto dia em que houve precipitação de 55 mm e, até os 32 dias avaliados as perdas foram mínimas.

Durante o período de 32 dias após a 1^a adubação, a precipitação pluviométrica mensurada foi de 168,6 mm, quantidade considerada muito baixa para a região neste período e, ainda, com o agravante de má distribuição; desse total, choveu 91 mm em apenas três dias (5^o, 6^o e 7^o dia após a adubação), o que aumentou as perdas de N-NH₃ (atingindo 36% de perda para a ureia convencional). A temperatura máxima registrada no período foi de 32,4^o C e a mínima de foi de 10,9^o C, a umidade relativa do ar nos dias que houve precipitações em volumes maiores (3, 4, 5, 6 e 32 dias após a 1^a adubação) ficou superior a 80%, já nos demais dias inferior a 70% atingindo o menor índice de umidade relativa (58,8%) no 28^o dia.

Figura 3 - Perdas de N-NH₃ acumuladas (A), diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a 1ª adubação nitrogenada no cafeeiro no ano de 2016/2017.



Fonte: Dados do autor (2018)

Os tratamentos ureia + NBPT e ureia + cobre + boro, apresentaram uma redução de 42% de perdas em comparação com a ureia convencional, totalizando cerca de 21% do aplicado perdido na forma de N-NH₃. Os maiores picos diários de volatilização ocorreram no 4º e 5º dias, visto que, a partir do 6º dia as perdas foram praticamente nulas. Quando aplicada ao solo, a molécula de NBPT é transformada em uma molécula análoga de oxigênio, o NBPTO, que age no sítio ativo da enzima urease, reduzindo sua atividade, atrasando conversão da ureia em amônia, conseqüentemente, acarretando menores perdas de N para o ambiente (DOMINGHETTI et al., 2016).

A umidade do solo proporcionada pela chuva no terceiro dia (10 mm), não foi capaz de incorporar a ureia ao solo, no entanto, foi suficiente para iniciar o processo de hidrólise, reduzindo a eficiência do NBPT, apresentando perdas por volatilização de 17 % do aplicado entre o 4º e o 6º dias. Após precipitação de 75 mm (6º e 7º dias) não foram mais observadas perdas devido a incorporação do fertilizante ao solo pela água da chuva.

Em diversos estudos avaliando reduções de perdas de N-NH₃ por meio de ureia estabilizada encontram-se resultados positivos para mistura de NBPT na ureia (CANTARELLA et al., 2008; SILVA, et al., 2011; PEREIRA et al., 2009; FARIA et al., 2013; DAWAR et al., 2011; FREITAS 2017). Takashio et al. (1988) observaram que os metais cobre, zinco e mercúrio apresentavam capacidade para reduzir a atividade da urease em uma solução tampão de pH em torno de 8,5, sendo o pH próximo deste valor ótimo para a atividade da enzima e temperatura constante de 37°C.

A ureia + cobre + boro apresentou resultados semelhantes ao NBPT, apresentando volatilização de 1% a menos. Os maiores picos de volatilização ocorreram no 4º, 5º e 6º dias após a aplicação. Outros pesquisadores têm encontrado resultados satisfatórios à ureia estabilizada com Cu e B (FARIA et al., 2014; GROHS et al., 2011; SILVA 2016;). A enzima urease apresenta dois núcleos centrais de níquel (Ni) em sua molécula; o ácido bórico se liga entre os 2 átomos de Ni, desta forma, a atividade da enzima é limitada (BENINI et al., 2004).

A ureia aplicada dissolvida na água apresentou uma perda de 5% do N aplicado, com uma diferença de 86% a menos de perdas quando comparada com a ureia aplicada de forma convencional. Quando aplicada em solução, a ureia tende a ser incorporada até uma camada de 3 a 5 cm no solo, neste local, há menor atividade da enzima urease pelo menor teor de matéria orgânica, e ainda, aumenta o contato do íon com os coloides do solo (CANTARELLA et al., 2008, ROCHETTE et al., 2013, SOUZA et al., 2017). A quantidade de água adicionada à ureia deve ser suficiente para que haja incorporação do fertilizante até uma profundidade razoável (3 a 5 cm) (CANTARELLA et al., 1999). Caso não seja incorporada, a umidade favorece a

hidrólise da ureia e, se o período de estiagem se prolongar, as perdas por volatilização podem ser ainda maiores (COSTA et al., 2008; PRASERTSAK et al., 2001).

Diante de um cenário de pouca precipitação, durante o período após a primeira adubação, alguns fertilizantes apresentaram poucas perdas de N: o nitrato e o sulfato amônio. Foram observadas perdas de 0,6% do N aplicado para o sulfato e 0,7% para o nitrato de amônio, valor praticamente insignificante quando comparado com os demais tratamentos. Perdas reduzidas destas fontes foram encontrados por outros pesquisadores (FREITAS 2017; DOMINGHETI et al., 2016; CHAGAS et al., 2016).

Para o 2º parcelamento da adubação nitrogenada o tratamento que apresentou a maior perda do N aplicado foi a ureia convencional, chegando a 21% de N acumulado (Figura 4) perdido na forma de NH_3 ao final do período avaliado. O segundo fertilizante que apresentou perdas elevadas foi a ureia + polímeros aniônicos (18% do aplicado).

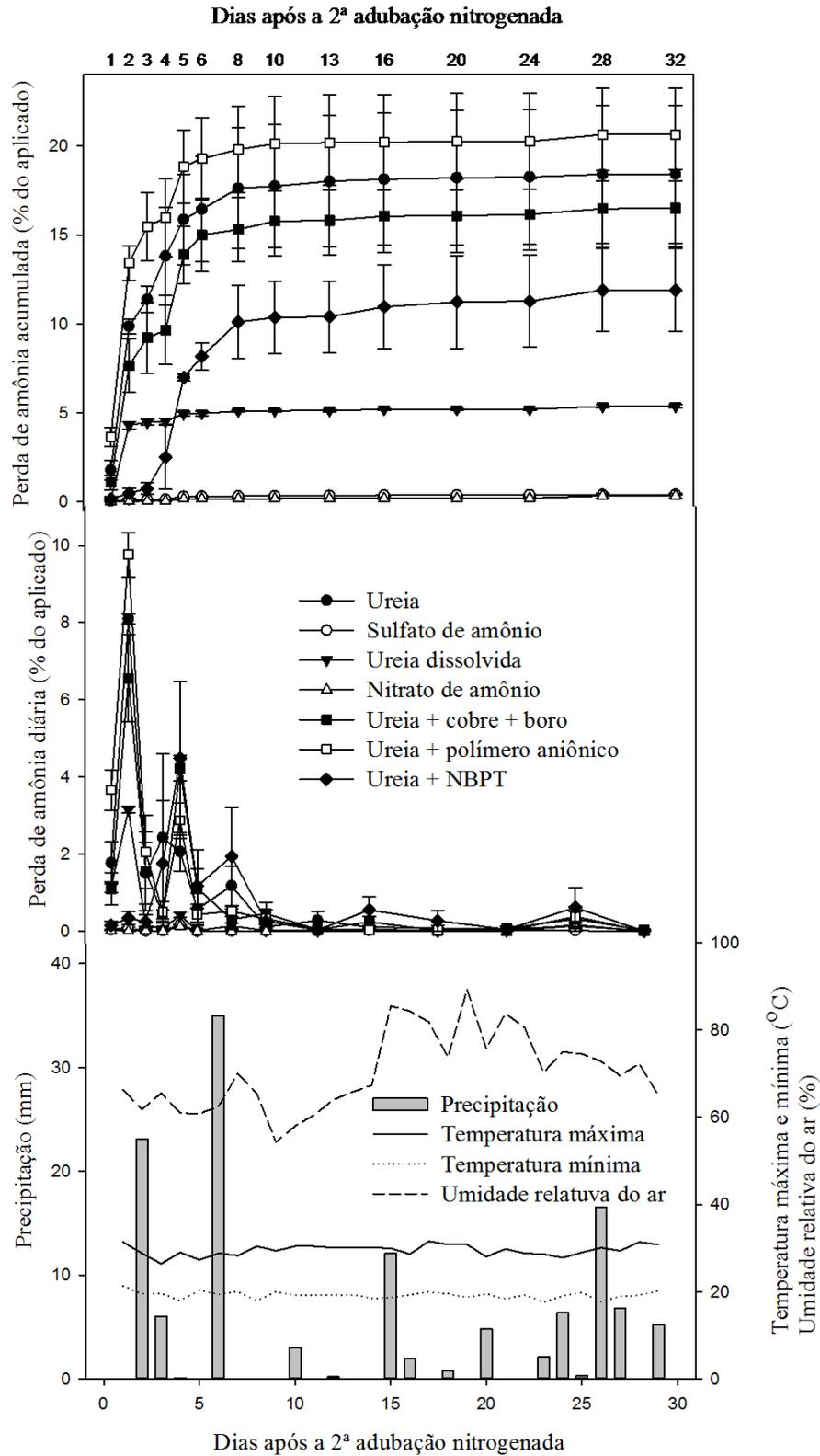
Observou-se na 2ª adubação, para a ureia convencional, que as maiores perdas de N- NH_3 ocorreram no 1º, 2º, 3º, 4º, 5º, 6º e 7º dias após a aplicação (18,4% acumulado), e as perdas diárias foram de 1,77; 8,59; 2,50; 2,42; 2,06; 1,57 e 1,58% do N aplicado respectivamente. Alguns autores citam que a maior parte da perda de N por volatilização ocorre até o 4º dia (LARA CABEZAS et al. 1997; VITTI, et al; 2002). No entanto outros autores encontraram perdas mais tardias e atribuíram os resultados à temperatura e ao pH do solo que, quando estão elevados a volatilização é favorecida (CANTARELA et al., 2008; FREITAS 2017; SOUZA 2015; DOMINGUETI et al., 2016).

As precipitações mais volumosas, ao final dos 32 dias avaliados ocorreram com 2, 6, 15 e 26 dias após a adubação (23,1; 35,0; 12,1; 16,5 mm), chegando a um acumulado no período de 124,4 mm. O acúmulo de chuva na 2ª adubação, foi inferior à primeira, no entanto sua distribuição foi melhor, havendo uma boa precipitação já no segundo dia (23,1 mm).

A melhor distribuição da chuva fez com que parte da ureia aplicada fosse incorporada ao solo, tornando-se menos susceptível à volatilização. Portanto, na 2ª adubação, foram obtidos 42% menos de perda de N quando comparado com a 1ª adubação.

Para os fertilizantes nitrogenados estabilizados (ureia + cobre + boro e ureia + NBPT), as perdas acumuladas de N- NH_3 chegaram a 16,5% e 11,9% respectivamente, o que representa 49 % a menos de perda que na 1ª adubação. Em comparação com a ureia convencional, houve uma redução na perda de N de 10,3% para a ureia + cobre + boro e 35,3% para a ureia + NBPT.

Figura 4 - Perdas de N-NH₃ acumuladas (A), diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a 2ª adubação nitrogenada do cafeeiro.



Fonte: Dados do autor (2018)

Bem como na adubação anterior, os fertilizantes nitrogenados amoniacais, sulfato de amônio e nitrato de amônio, apresentaram as menores perdas do nutriente para a atmosfera, sendo uma perda de 0,4% para o sulfato e 0,2% para o nitrato.

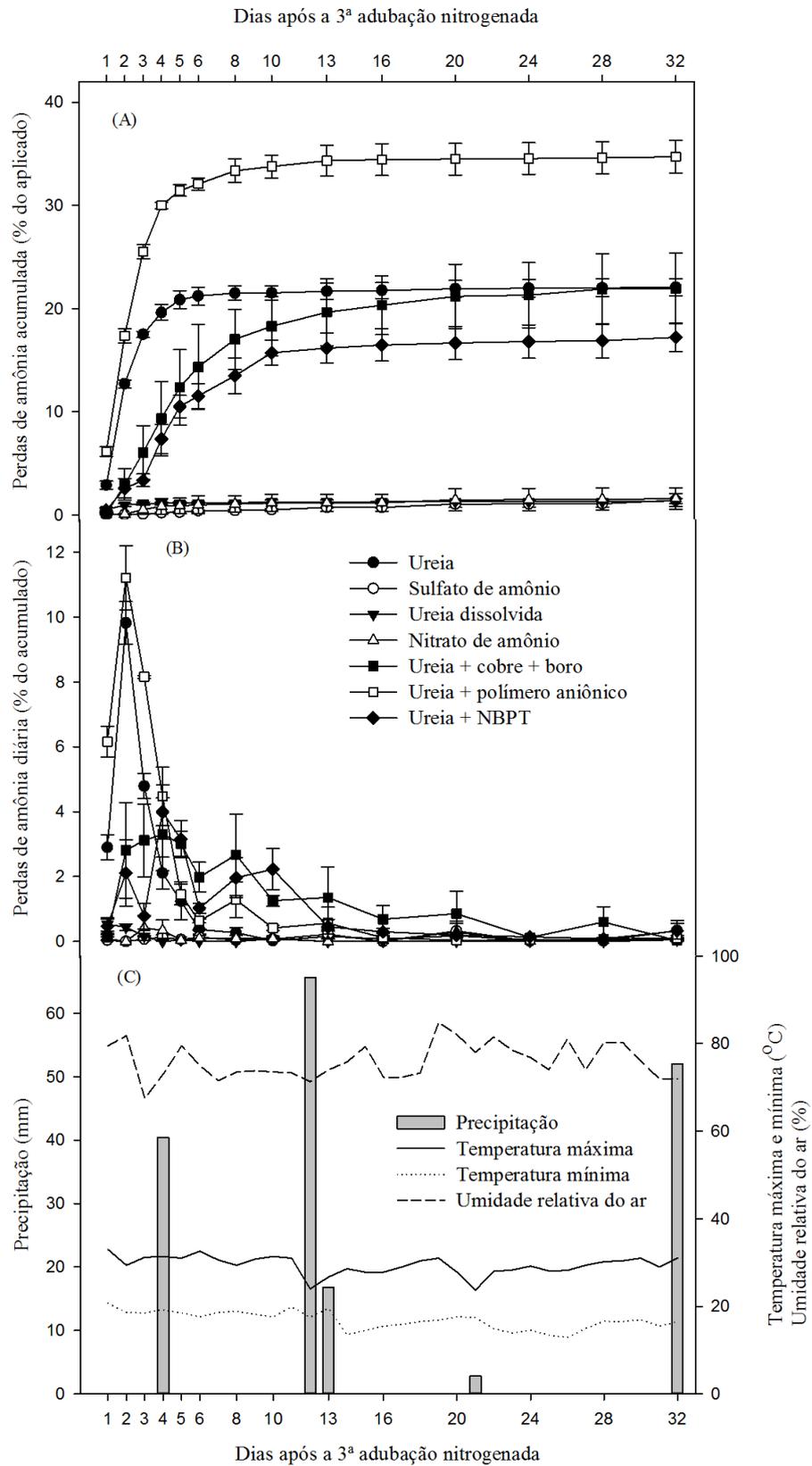
Na 3ª adubação nitrogenada, a ureia + polímeros aniônicos apresentou 37,4% de perdas de N-NH₃, enquanto a ureia convencional 22,1% (Figura 5). Resultados semelhantes foram encontrados por Domingheti et al. (2016) e Freitas (2017). Inibidores de nitrificação mantêm o N na forma amoniacal no solo, o que contribui para o aumento da volatilização pela seguinte reação: [NH₄ + (solução do solo) + OH⁻ (superfície camada de solo) → NH₃ ↑ (atmosfera) + H₂O] (DOMINGUETI et al., 2016).

Analisando os índices climatológicos, três dias antes da terceira adubação (05/03/2017), houve uma precipitação de 18 mm no local do experimento, sendo assim, quando os tratamentos foram aplicados, o solo estava úmido, a umidade relativa do ar em 79,5% e temperatura máxima de 33° C (Figura 6c). Conforme relatado por Cantarella et al. (2008), estas condições aceleram a hidrólise da ureia, sendo que nestas condições ocorreram grandes perdas de N principalmente na ureia convencional e ureia + polímeros aniônicos. A eficiência dos fertilizantes estabilizados ureia + cobre + boro e ureia + NBPT também pode ser reduzida.

Para os fertilizantes estabilizados, a ureia mais + cobre + boro e ureia + NBPT apresentaram valores semelhantes quanto à volatilização da amônia, observando picos de volatilização de 1,5 a 3,0% do aplicado (Figura 4b) a partir do 2º dia após a adubação; a partir do 4º dia, após precipitação de 40 mm, as perdas de N-NH₃ foram mínimas para os dois tratamentos. No acumulado do período avaliado, a ureia + cobre + boro obteve 21,9% do fertilizante aplicado perdido por volatilização, enquanto a Ureia + NBPT apresentou 17,2% de perda, uma diferença de 21,5% de um em comparação com o outro.

Mais uma vez a ureia dissolvida em água mostrou ser uma boa alternativa, para reduzir as perdas de N-NH₃ por volatilização; o acumulado no período para este tratamento ficou em apenas 1,3% do total aplicado, em comparação com a ureia aplicada de forma convencional (22,1% do aplicado); foi observada uma redução de 94,1% das perdas com a prática de aplicar a ureia diluída no solo. Diante dos valores apresentados, este método tem sido mais eficiente que os fertilizantes de tecnologia estabilizada, ficando bem próximo das perdas encontradas para o nitrato de amônio e o sulfato de amônio (1,4% e 1,5% de perda respectivamente).

Figura 5 - Perdas de $N-NH_3$ acumuladas (A), volatilização diária (B) de fertilizantes nitrogenados convencionais e estabilizados e condições climáticas (C) após a 3ª adubação nitrogenada do cafeeiro.



Fonte: Dados do autor (2018)

Foi encontrada diferença significativa ($p \leq 0,05\%$) para os tratamentos em todas as três adubações e, inclusive, na média geral (Tabela 3).

Conforme apresentado na tabela 3, nas das três adubações nitrogenadas, dos 300 kg ha⁻¹ que foram aplicados em todos os tratamentos, a ureia + polímeros aniônico apresentou a maior perda de NH₃ por volatilização (91,8 kg ha⁻¹), observando uma perda de 15,3 kg ha⁻¹ a mais que a ureia convencional (76,5 kg ha⁻¹). Os tratamentos que apresentaram as maiores reduções de perdas de amônia foram o nitrato e o sulfato de amônio, com aproveitamento de 298,4 kg dos 300 kg aplicados no solo.

Tabela 3 - Perdas acumuladas de amônia (% do nitrogênio aplicado) para os fertilizantes convencionais e estabilizados em três adubações nitrogenadas no cafeeiro, em Lavras - MG.

Tratamentos	Adubação			% N-NH ₃ ⁽¹⁾ Média	kg N-NH ₃ ⁽²⁾ Total
	1 ^a	2 ^a	3 ^a		
Ureia	36,2 a	18,4 a	22,1 c	25,5 b	76,5 b
Ureia dissolvida	5,6 c	5,4 b	1,3 e	4,1 e	12,3 e
Sulfato de amônio	0,6 d	0,4 b	0,8 e	0,6 f	1,8 f
Nitrato de amônio	0,7 d	0,2 b	0,5 e	0,5 f	1,4 f
Ureia + cobre + boro	20,6 b	16,5 a	25,3 b	20,8 c	62,4 c
Ureia + polímero aniônico	36,5 a	20,6 a	34,7 a	30,6 a	91,8 a
Ureia + NBPT	21,0 b	11,90 a	17,21 d	16,71 d	50,12 d
Média	17,3A	10,5C	14,6B	14,1	42,4
Coeficiente de variação (%)	15,4	27,8	11,2	9,6	9,6
Precipitação (mm)	169	124	179		

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$)

¹ Percentual volatilizado de nitrogênio aplicado em três adubações (300 Kg ha⁻¹).

² Quantidade de nitrogênio (Kg ha⁻¹) perdido por volatilização.

Fonte: Dados do autor (2018)

A ureia + cobre + boro apresentou uma perda de 62,4 kg ha⁻¹, 16,94 kg a menos que a ureia convencional. Para a ureia tratada com NBPT, foram observados valores de 50,1 kg ha⁻¹ e, na ureia, foram volatilizados 29,2 kg a mais. Resultados obtidos por Souza (2013) mostraram que a ureia + NBPT seguiu a volatilização do N da ureia por até cinco dias e, após precipitação de 10 mm, suficiente para incorporar o fertilizante no solo, as perdas foram muito baixas.

Avaliando a volatilização de amônia na cultura do milho sob plantio direto, Faria et al. (2013) observaram perdas de 13,7 kg ha⁻¹ para a ureia + cobre + boro e 18 kg ha⁻¹ de perda para a ureia convencional, de uma dose total de 100 kg ha⁻¹, uma redução de 31,4% na perda de nitrogênio. Analisando perdas de N por volatilização, Contin (2007) verificou reduções significativas nas perdas de NH₃ da ureia, quando era tratada com NBPT. Cantarella et al. (2007) ressaltam que essas tecnologias são muito importantes na diminuição das perdas de

nitrogênio, no entanto, dependendo das condições climáticas a que são submetidas, sua eficiência pode ser reduzida.

Na média das três adubações, para a ureia aplicada diluída em água, houve uma redução de 84,4% em comparação com a ureia aplicada convencionalmente, obtendo-se uma perda acumulada de 12,3 kg ha⁻¹ dos 300 kg aplicados, considerando somente as perdas por volatilização.

Outro grupo de fertilizantes nitrogenados, com o propósito de reduzir as perdas do nutriente por volatilização, são os chamados fertilizantes de liberação lenta ou controladas, que são conhecidos como fertilizantes de eficiência aumentada (TRENKEL, 2010).

Para os fertilizantes de aplicação única (ureia+ enxofre + polímero, ureia + película plástica, ureia formaldeído e ureia revestida por polímero) as perdas de amônia diária estão esboçadas na Figura 6, a volatilização acumulada na Figura 7 e os dados climáticos na Figura 8.

Nas Figuras 6, 7 e 8, estão apresentados os dados de volatilização diária, volatilização acumulada no período avaliado (232 dias) e dados climáticos (precipitação, temperatura máxima e mínima e umidade relativa do ar), respectivamente. Os fertilizantes de liberação lenta ou controlada avaliados na pesquisa foram: Ureia + S⁰ + polímeros, Ureia + resina plástica, Ureia formaldeído e Ureia + polímero insolúvel em água. Ressalta-se que todos os quatro fertilizantes foram aplicados em um único parcelamento, na dose de 300 kg ha⁻¹ de N (mesma dose que os fertilizantes convencionais e estabilizados que foram aplicados em três parcelamentos de 100 kg ha⁻¹ de N).

Observa-se na Figura 6, que as perdas de N-NH₃ nos fertilizantes de liberação lenta ou controlada se estendem por um período maior, enquanto nos fertilizantes convencionais e estabilizados as perdas ocorreram até o 8º dia (Figuras 4, 5 e 6); nos fertilizantes de aplicação única, foram observadas perdas de amônia até 120 dias após a adubação nitrogenada. No entanto, as perdas observadas diariamente nos adubos nitrogenados de liberação lenta ou controlada foram abaixo de 1% da quantidade aplicada.

Dos tratamentos avaliados, a ureia + resina plástica e Ureia + S⁰ + polímeros apresentaram as maiores perdas acumuladas, após 232 dias da adubação, com 5,9% e 5,6% do aplicado, o que corresponde a 17,7 e 16,8 kg ha⁻¹ de N perdidos por volatilização. Essa perda corresponde a 78,26% menor em comparação com a ureia convencional. Outros autores encontraram perda de N-NH₃ semelhantes ao presente estudo; Jantalia et al., (2012) observaram perdas de 0,1% a 3,6% e 0,3 a 4,0 em diferentes tipos de solos, para fertilizantes de liberação lenta e controlada em cobertura na cultura do milho.

Os maiores picos de volatilização diária da Ureia + S⁰ + polímeros ocorreram 5, 13 e 43 dias após a adubação nitrogenada (Figura 7) e, por volta do 8º dia, 50% das perdas já haviam ocorrido, aos 43 dias 90% e daí por diante as perdas diárias foram mínimas, atingindo 100% das perdas aos 162 dias após a adubação.

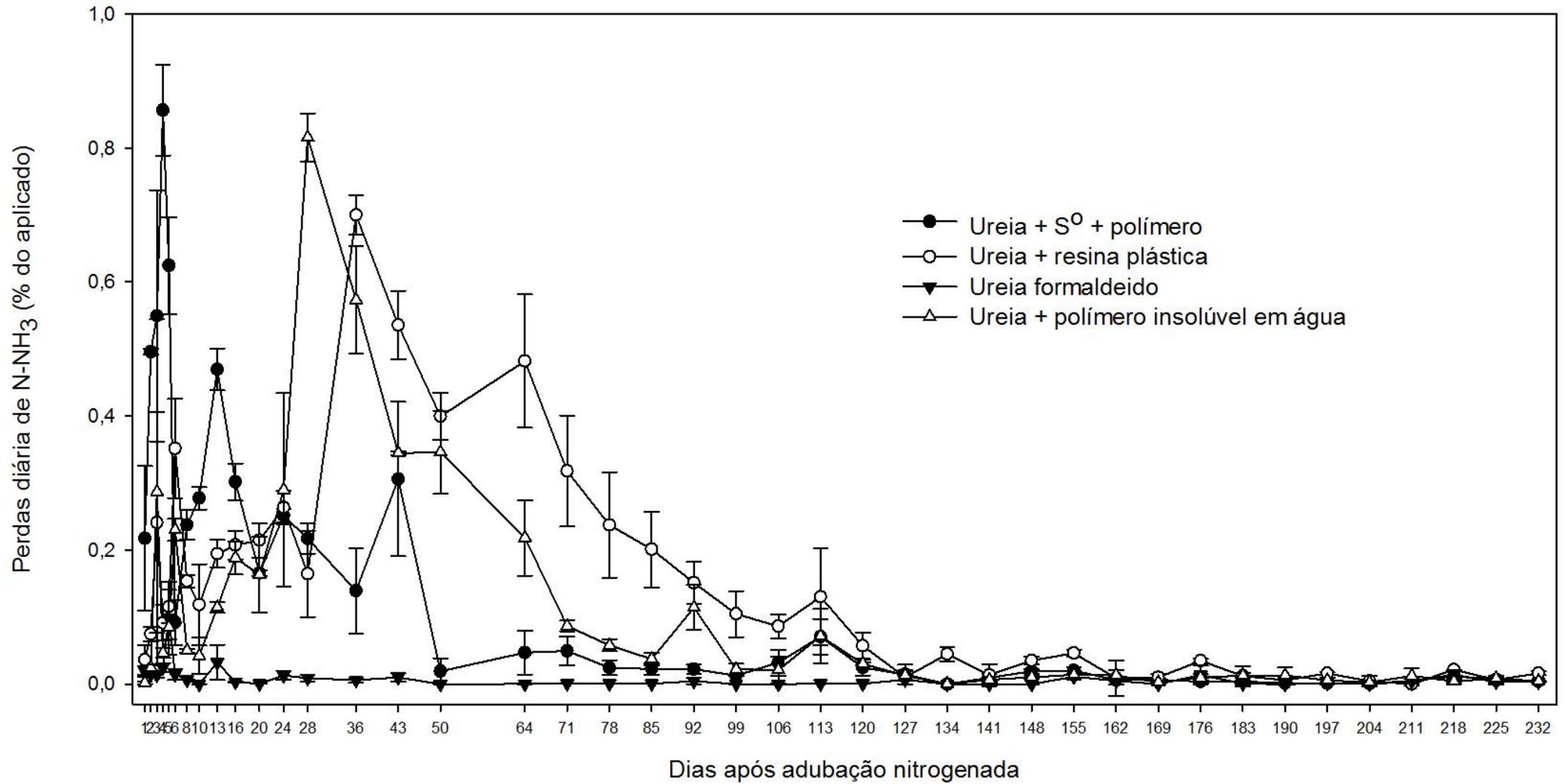
Muitos estudos têm sido realizados a fim de analisar a redução na volatilização de ureias revestidas com S⁰. Alguns autores começaram a observar que o nitrogênio é liberado na forma amídica por fissuras na proteção de enxofre que é causada pela água. Além do mais, para disponibilizar o nutriente, microorganismos devem degradar a camada de enxofre, sendo assim, somente a umidade não é suficiente para liberar o nutriente. Então, as condições que favoreçam a proliferação destes organismos vivos são importantes para liberação de nitrogênio de acordo com a necessidade da cultura (SOUZA, 2015).

Para a ureia + resina plástica, observou-se um pico volatilização de 0,7% no 36º dia, visto que, antes desta data, as perdas de amônia diária não ultrapassaram 0,3%. Outros picos de volatilização foram observados 43, 50 e 64 dias após a adubação nitrogenada, daí por diante as perdas foram decrescendo. Verificou-se que 38% das perdas se concentraram entre o 36º e o 64º dia após a adubação, a partir dos 120 dias, não foram observadas mais perdas para este tratamento.

Observando os dados meteorológicos, conforme apresentado na Figura 8, durante os 232 dias avaliando a volatilização, houve precipitação de 856,5mm. Chuvas volumosas, acima de 50 mm, foram observadas 8, 130 e 150 dias após a fertilização e 97 dias dos 232 avaliados e a umidade relativa do ar se manteve a cima de 75%. Foi observado um período de pouca precipitação do 9º ao 30º dia, e do 70º ao 120º dia após a adubação, no restante do período, as chuvas foram distribuídas com intervalos de 10 e no máximo 15 dias, reduzindo a umidade relativa do ar para próxima de 40% a 45% no período seco.

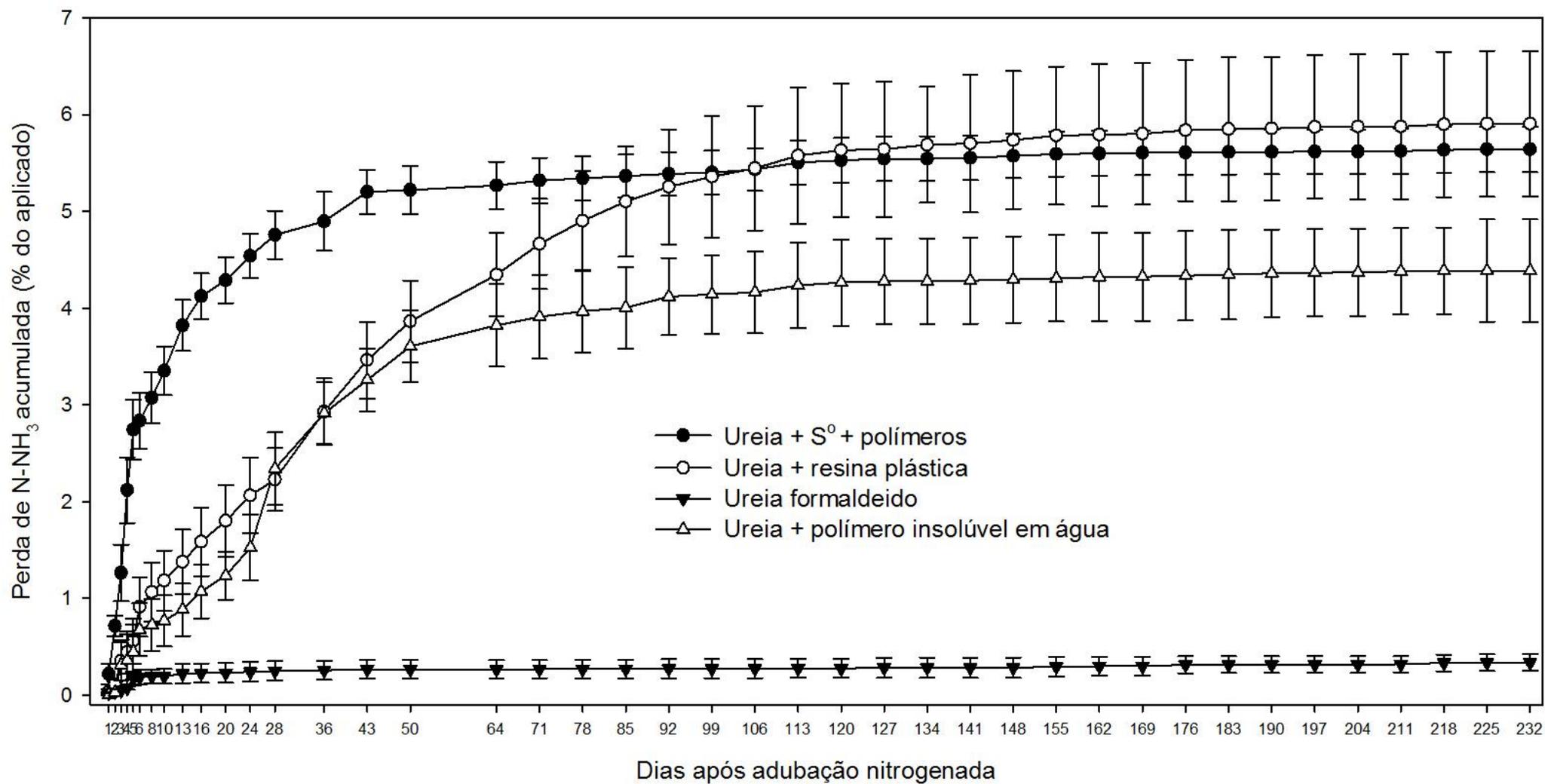
Não foi observada uma relação nas perdas de nitrogênio dos fertilizantes de liberação e controlada com as precipitações ocorridas. Mesmo em dias de maior precipitação apresentaram perdas, em contrapartida, em alguns dias de períodos mais secos foram observadas poucas perdas de amônia. Resultados semelhantes foram encontrados por Freitas (2016), e esse fato ocorre em razão de esses fertilizantes possuírem controle químico, físico e microbiológico da taxa de liberação do nitrogênio. A água da chuva não solubiliza de imediato o nutriente, tornando-o susceptível à volatilização.

Figura 6 - Perdas diárias de N-NH₃ após adubação nitrogenada com fertilizantes de liberação lenta ou controlada em lavoura cafeeira.



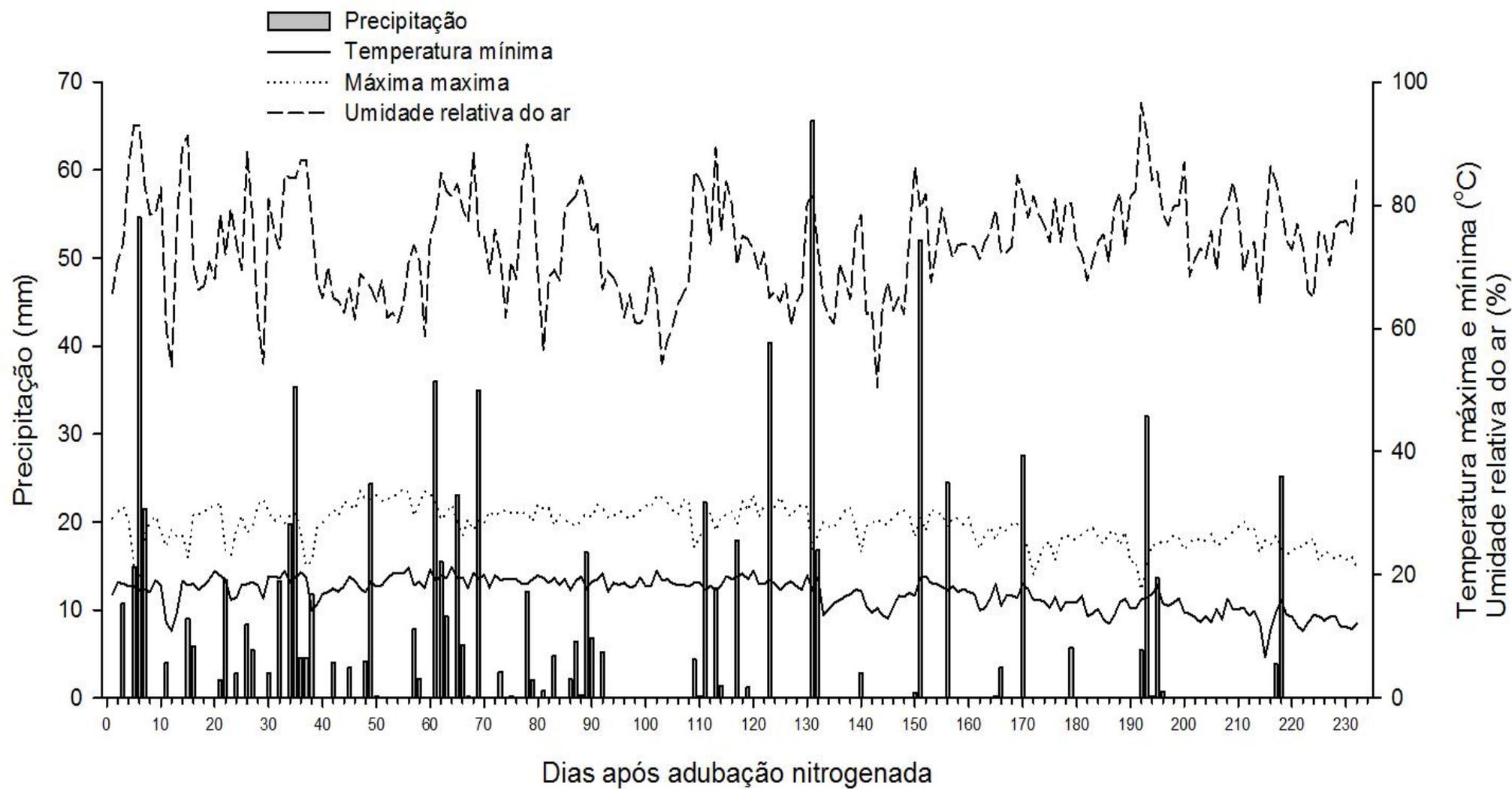
Fonte: Dados do autor (2018)

Figura 7 - Perdas acumuladas de N-NH₃ após adubação nitrogenada com fertilizantes de liberação lenta ou controlada em lavoura cafeeira.



Fonte: Dados do autor (2018)

Figura 8 - precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar em lavoura de cafeeiro após adubação nitrogenada de fertilizantes de liberação lenta ou controlada.



Fonte: Dados do autor (2018)

A ureia + polímero insolúvel em água, apresentou cerca de 4,4% de perdas de nitrogênio, o que corresponde a 13,1 kg ha⁻¹, sendo 83,4% menor que a ureia convencional, mostrando a eficiência destes fertilizantes de liberação controlada na redução das perdas de NH₃. Outros autores têm encontrado aumento na eficiência do aproveitamento de fertilizante nitrogenado quando se aplica fertilizantes de liberação lenta ou controlada (SOUZA, 2015; MORGAN, 2009; MEDINA et al., 2008).

A ureia formaldeído apresentou perdas muito reduzidas de nitrogênio, 0,34% do aplicado, ou 1,0 kg ha⁻¹ (Tabela 4), mostrando ser uma tecnologia eficiente para controlar a volatilização de N, sendo seus resultados muito semelhantes ao sulfato e nitrato de amônio.

Na Tabela 4 estão esboçados os dados de volatilização em percentagem dos 300 kg aplicados e a quantidade em kg perdidos por volatilização por hectare. Observou-se diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os fertilizantes de liberação lenta e controlada. O tratamento que apresentou a menor volatilização de nitrogênio foi a ureia formaldeído, com 0,34% do aplicado e 93,6% menor que a média dos demais tratamentos (Ureia + S⁰ + polímero, Ureia + resina plástica, Ureia + polímero insolúvel em água), visto que não apresentaram diferença significativa.

Tabela 4 - Perdas acumuladas de N-NH₃ para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada aplicados em único parcelamento.

Fertilizantes	% N-NH ₃	kg ha ⁻¹ N-NH ₃
Ureia + S ⁰ + polímero	5,64 a	16,93 a
Ureia + resina	5,91 a	17,72 a
Ureia formaldeído	0,34 b	1,01 b
Ureia + polímero insolúvel em água	4,60 a	13,79 a
Média	4,12	12,36
Coeficiente de variação (%)	22,7	22,8

Nota: As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$). Para todos os tratamentos foram aplicados 300 Kg ha⁻¹ de Nitrogênio em dose única.

Fonte: Dados do autor (2018)

Seguem apresentados, na Tabela 5, os dados referentes à volatilização de NH₃ de fertilizantes nitrogenados convencionais e ureia estabilizada (aplicaram-se 300 kg de N ha⁻¹ divididos em três parcelamentos) e de fertilizantes de liberação lenta ou controlada (aplicaram-se 300 kg de N ha⁻¹ em parcelamento único). Observou-se diferença significativa entre os tratamentos pelo teste estatístico de Skott Knott ($p \leq 0,05$).

Conforme apresentado na Tabela 5, os tratamentos seguem em ordem decrescente de volatilização da amônia: Ureia + polímero aniônico > Ureia > Ureia + cobre + boro > Ureia +

NBPT > Ureia + resina plástica = Ureia + S⁰ + polímero = Ureia + polímero insolúvel em água = Ureia dissolvida > Sulfato de amônio = Nitrato de amônio = Ureia formaldeído.

Tabela 5 - Média das perdas acumuladas de N-NH₃ para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada, estabilizados e convencionais na cultura do cafeeiro.

Fertilizantes	Perdas de N-NH ₃ (kg ha ⁻¹)	Perdas de N-NH ₃ (%)
Ureia	76,5 b	25,5 b
Ureia dissolvida	12,3 e	4,1 e
Sulfato de amônio	1,8 f	0,6 f
Nitrato de amônio	1,4 f	0,5 f
Ureia + cobre + boro	62,4 c	20,8 c
Ureia + polímero aniônico	91,8 a	30,6 a
Ureia + NBPT	50,1 d	16,7 d
Ureia + S ⁰ + polímero	16,9 e	5,6 e
Ureia + resina	17,7 e	5,9 e
Ureia formaldeído	1,0 f	0,3 f
Ureia + polímero insolúvel em água	13,8 e	4,6 e
Média	31,5	10,5
Coefficiente de variação (%)	15,1	15,1

Nota: As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Dados do autor (2018)

Pode-se observar pela Tabela 5 que os fertilizantes nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído apresentaram as menores perdas de N, não havendo diferença estatística ($p \leq 0,05$) entre si. Resultados muito parecidos foram observados por outros autores quando trabalharam com fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados e de liberação lenta ou controlada (LARA CABEZAS e SOUZA, 2008; FARIA et al., 2014). Todos os três fertilizantes apresentam reação ácida no solo (DOMINGUETI, 2016).

Um segundo grupo que apresentou volatilização de N-NH₃ inferior a 6%, foi a ureia dissolvida em água, ureia + resina plástica, ureia + S⁰ + polímero, ureia + polímero insolúvel em água. A ureia dissolvida em água e aplicada em solução na superfície do solo se mostrou tão eficiente na retenção da volatilização do N quanto os fertilizantes de liberação lenta ou controlada. Aplicando a ureia desta forma, proporciona a condição ideal para o melhor aproveitamento do N aplicado conforme relatado por Lara Cabezas et al., (1997), que concluíram ser mais importante haver umedecimento do solo durante ou depois da aplicação do que aplicar a ureia sobre o solo úmido e não ocorrer precipitação nos próximos dias.

Em virtude dos picos de volatilização não terem relação direta com a precipitação (Figuras 6 e 8), para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada a umidade não influenciou diretamente na liberação do N para o solo. A taxa de liberação é controlada de maneira química

e microbiológica (SHAVIV, 2005). Assim, mesmo em períodos de pouca precipitação, ou independente da condição de umidade do solo em que o fertilizante foi aplicado, as perdas de N foram pequenas, comprovando a eficiência destes fertilizantes nitrogenados.

Mesmo apresentando boa eficiência, os fertilizantes de liberação lenta ou controlada não têm sido utilizados em larga escala por causa do seu alto valor agregado (FREITAS, 2016; DOMINGHETTI, 2016). Assim sendo, técnicos recomendam aos produtores a utilização de fertilizantes menos eficientes, porém com custos menores. Para compensar as perdas de N, é aplicada uma dose um pouco maior que a cultura exige, desta forma, a adubação fica mais acessível ao orçamento do produtor. O agravante é estimar a quantidade exata do nutriente que será perdida nas condições em que os fertilizantes estarão sendo aplicados, para isto, este estudo e outros mais (SOUZA, 2015; DOMINGHETTI, 2016; SILVA 2016; FREITAS, 2016) vêm ajudar na tomada de decisão de qual fertilizante e a dose a ser aplicada.

Um fator vantajoso dos fertilizantes de liberação controlada é a possibilidade de ser aplicado em parcelamento único, porque a liberação do nutriente acontece gradativamente pela temperatura, forças mecânicas, químicas (CANCELLIER, 2013). Em lavouras de difícil acesso, estes fertilizantes se apresentam como uma boa alternativa por serem de única aplicação.

Os fertilizantes estabilizados, ureia + cobre + boro e ureia + NBPT, apresentaram valores medianos na volatilização de NH_3 , mostrando ser menos eficientes que os fertilizantes de liberação lenta ou controlada (cerca de 78,0% mais perda de N). Em comparação com a ureia convencional e ureia + polímeros aniônico eles foram superiores, com cerca de 33% a mais de aproveitamento do N (Tabela 5).

No presente estudo, foram encontradas perdas acumuladas de N-NH_3 de 25,5% do nitrogênio aplicado nas três adubações, o que corresponde a $76,5 \text{ kg ha}^{-1}$. Em outros estudos encontraram-se perdas de 15 a 22% (SCIVITTARO, 2010), Freitas, (2016) encontrou volatilização de 23 % do aplicado em três adubações na cultura do café, já Contin (2007) avaliando fertilizantes nitrogenados na cultura da cana observou perdas de 16% para a ureia convencional e, Dominghetti, 2016 encontrou perda de 31 % em adubações no cafeeiro. As maiores perdas de N-NH_3 ocorrem nos primeiros dias após a adubação nitrogenada, Cancellier (2013) observou que 12% das perdas ocorreram até o segundo dia e que próximo ao 6º dia 100% das perdas já haviam ocorrido. Observa-se que até o sexto dia, os fertilizantes de liberação lenta ou controlada apresentaram um percentual das perdas total bem menor que os fertilizantes estabilizados e convencionais, mostrando que levam um período maior para liberar o nitrogênio presente nos grânulos.

4.2 pH DO SOLO

Foi observada diferença significativa ($p \leq 0,05$) nos valores de pH do solo (camada de 0 a 5 cm) submetido a adubação nitrogenada (Tabela 6).

Dentre os fatores que influenciam a volatilização de amônia, o pH do solo na camada superficial (0-5 cm) é um dos mais relevantes, visto que, em um meio mais alcalino, as perdas de $N-NH_3$ são maiores (WATSON et al., 2008; HARGROVE, 1998).

Na avaliação prévia de pH, ou seja, antes da aplicação dos tratamentos, o fertilizante que apresentou o menor dado de pH superficial do solo foi a ureia + polímeros aniônicos (4,79), enquanto a média foi de 5,26.

Antes da aplicação do 2º parcelamento dos fertilizantes convencionais e estabilizados, os tratamentos que apresentaram os menores valores de pH, em ordem decrescente, foram: ureia + NBPT (4,80), nitrato de amônio (4,77), ureia + resina plástica (4,70), ureia formaldeído (4,33), Ureia + S^0 + polímero (4,27) e sulfato de amônio (4,23).

Tabela 6 - Avaliação da variabilidade do pH do solo, na camada de 0 a 5 cm, influenciada por três adubações de fertilizantes nitrogenados no cafeeiro.

Fertilizantes	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	60 dias após 3ª	Média Coletas	CV (%)
Ureia	5,27aA	5,30aA	5,70aA	5,50aA	5,44 a	5,05
Ureia dissolvida	5,12aA	5,50aA	5,70aA	5,57aA	5,47 a	3,69
Sulfato de amônio	5,14aA	4,23bB	4,93aA	4,47bB	4,69 b	5,60
Nitrato de amônio	5,76aA	4,77bB	5,03aB	4,87bB	5,11 a	4,48
Ureia + cobre + boro	5,20aA	5,50aA	5,40aA	5,37aA	5,39 a	4,96
Ureia + polímero aniônico	4,79aB	5,47aA	5,43aA	5,57aA	5,31 a	7,53
Ureia + NBPT	5,39aA	4,80bA	5,30aA	5,33aA	5,21 a	4,78
Ureia + S^0 + polímero	4,84aA	4,27bB	5,23aA	4,80bA	4,79 b	3,59
Ureia + resina	5,45aA	4,70bA	5,03aA	5,37aA	5,14 a	8,42
Ureia formaldeído	5,63aA	4,33bB	5,20aA	4,77bA	4,98 b	5,35
Ureia + polímero insolúvel em água	5,28aA	5,27aA	5,63aA	5,37aA	5,39 a	10,81
Média	5,26A	4,93A	5,33A	5,18A	5,18	
Coefficiente de variação (%)	5,32	9,65	8,05	6,54	7,77	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Dados do autor (2018)

Sessenta dias após a última adubação nitrogenada, o nitrato de amônio, sulfato de amônio, ureia formaldeído e ureia + S^0 + polímero proporcionaram os menores valores de pH superficial do solo.

No presente estudo não foi observada redução significativa do pH do solo quando submetido aos fertilizantes nitrogenados, apresentando pH inicial (média entre os tratamentos) de 5,26 e 60 dias após a última adubação de 5,18 (Tabela 6). Já Dominghetti (2016) trabalhando na mesma área experimental, encontrou uma redução de 1,75 unidades de pH quando aplicou fertilizantes nitrogenados na cultura do cafeeiro. Freitas (2017), também na mesma área, observou uma redução de 0,66 unidades de pH no final do período avaliado do que antes da primeira adubação nitrogenada.

Os tratamentos que apresentaram redução significativa nos valores de pH da camada de 0 a 5 cm foram o nitrato e sulfato de amônio, apresentando 5,76 e 5,14 antes da primeira adubação e 4,87 e 4,47, respectivamente, 60 dias após a terceira adubação nitrogenada. Resultados semelhantes foram encontrados por Vitti et al. (2002) que observaram uma redução de 1,1 unidades de pH, quando adicionaram o sulfato de amônio em mistura na ureia.

Segundo Villas Bôas (1995), em razão do efeito acidificante do sulfato de amônio, seria uma boa alternativa aplicá-lo em mistura com a ureia, porque, assim, o pH próximo ao grânulo de ureia não ficará tão alcalino e as perdas devem ser reduzidas. No entanto Costa, Vitti e Cantarella (2003) trabalhando com adubos nitrogenados em cobertura na cana-de-açúcar, observaram que, quando se mistura a ureia + o sulfato de amônio, o ambiente acidificante provocado pelo sulfato de amônio não reduz as perdas da ureia, e ao contrário, o meio alcalino provocado pela hidrólise da ureia, faz com que haja perdas por volatilização do sulfato de amônio. Isso ocorre, porque há um deslocamento do equilíbrio químico entre a amônia e o íon amônio, representado pelo esquema: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Outros autores fizeram uma experimentação em laboratório, misturando 50% de ureia e 50% de sulfato de amônio; observaram que nesta proporção a redução de volatilização de N foi menor quando comparado com a ureia pura e a mistura em concentrações menores de sulfato de amônio. Os autores relataram que a redução nas perdas de N ocorreu, por causa do pH mais ácido, proporcionado pelo sulfato de amônio e pela redução de N-amídico proporcionado pela mistura dos fertilizantes (Vitti et al., 2002).

4.3 Teores de N, S, Ca e B na folha

Foram encontradas diferenças significativas ($p \leq 0,05$), para o teor foliar de N entre os fertilizantes aplicados na segunda adubação e na média das três adubações conforme dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Teor de nitrogênio (g kg^{-1}) na folha de cafeeiro, após aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Teor foliar de N (g kg^{-1})			Média três adubações	Coeficiente de Variação
	60 dias após 1ª adubação	60 dias após 2ª adubação	60 dias após 3ª adubação		
Ureia	29,60 aA	21,13 bA	29,07 aA	29,43 b	5,52
Ureia dissolvida	31,87 aA	23,93 bA	30,40 aA	30,07 b	7,27
Sulfato de amônio	32,67 aA	30,30 bA	31,10 aA	31,37 a	4,46
Nitrato de amônio	32,20 aA	32,80 aA	30,13 aA	31,71 a	3,14
Ureia + cobre + boro	29,90 aA	28,97 bA	28,37 aA	29,08 b	2,28
Ureia + polímero aniônico	29,83 aA	28,37 bA	29,03 aA	29,08 b	2,38
Ureia + NBPT	30,47 aA	31,43 aA	28,63 aA	30,18 b	6,24
Ureia + S^0 + polímero	30,07 aA	29,07 bA	29,57 aA	29,57 b	2,15
Ureia + resina	32,17 aA	28,90 bB	29,03 aB	30,03 b	4,13
Ureia formaldeído	32,23 aA	29,73 bB	30,13 aB	30,70 a	3,00
Ureia + polímero insolúvel em água	28,97 aA	30,20 bA	30,10 aA	29,76 b	12,70
Média	30,91	29,76	29,60	30,09	
Faixa crítica*	28 a 32	28 a 31	26 a 31	28 a 31	
Coeficiente de Variação (CV)	6,79	3,84	5,63	3,10	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

*Faixa crítica recomendada por Mallavolta (1992).

Fonte: Dados do autor (2018)

Na 2ª adubação nitrogenada foi encontrada diferença estatística ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos apresentando o maior teor de N na folha o nitrato de amônio ($32,80 \text{ g kg}^{-1}$), ureia + NBPT ($31,43 \text{ g kg}^{-1}$) e os demais não diferiram entre si pelo teste estatístico. Isso pode ser explicado pela quantidade de N que foi volatilizado da ureia convencional, influenciando no teor do nutriente no tecido foliar. Já o nitrato de amônio, como foi o fertilizante que apresentou as menores perdas por volatilização (Tabela 5), conseqüentemente, manteve o N na folha em níveis mais elevados (Tabela 7).

Na média das três adubações nitrogenadas, os maiores teores foliares de N foram encontrados para o nitrato de amônio ($31,71 \text{ g kg}^{-1}$), sulfato de amônio ($31,37 \text{ g kg}^{-1}$) e ureia formaldeído ($30,70 \text{ g kg}^{-1}$), os demais tratamentos não apresentaram diferença estatística ($p < 0,05$) entre si. Esses dados corroboram com os dados de volatilização, tendo em vista que estes fertilizantes foram os que apresentaram as menores perdas de N por volatilização (Tabela 5).

Nas três adubações nitrogenadas, os teores de nitrogênio foram bem semelhantes, mostrando que, durante todo o ciclo produtivo do café na safra 2016/2017, as plantas ficaram

bem nutridas com a quantidade de nitrogênio aplicada, mesmo nos tratamentos que apresentaram grande quantidade de N perdido por volatilização.

Trabalhando com adubação nitrogenada no cafeeiro dividido em três parcelamentos, Domingueti (2016) observou uma redução de N na folha de $3,0 \text{ g kg}^{-1}$ da primeira para a terceira aplicação dos fertilizantes. Também trabalhando com adubação do cafeeiro na safra de 2015/2016, Freitas (2017) encontrou uma redução de $4,5 \text{ g kg}^{-1}$ de N 60 dias após a última adubação, em comparação com a primeira adubação. No entanto observou-se que os teores encontrados pelos autores citados ficaram todos dentro da faixa crítica recomendada por Mallavolta (1992).

Conforme dados de volatilização apresentados na Tabela 5, observa-se diferença significativa no aproveitamento do nitrogênio aplicado em relação ao tipo de fertilizante aplicado. No entanto, na Tabela 7, estão esboçados os dados de teores de N na folha, os quais mostram que não houve grandes diferenças nos teores de nitrogênio mesmo nos fertilizantes que apresentaram maior volatilização conforme a Tabela 5. Tal fato pode ser explicado já que as adubações são recomendadas com base nos manuais, que já levam em consideração as possíveis perdas dos fertilizantes nitrogenados, principalmente por volatilização, considerado que grande parte do N aplicado na agricultura brasileira tem como fonte a ureia convencional. (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). Assim, mesmo havendo perdas do nutriente, a alta dose de nitrogênio aplicada não permite que os níveis de N na folha fiquem abaixo do nível crítico.

A quantidade de nitrogênio aplicada nos tratamentos (300 kg ha^{-1}) somada ao teor de matéria orgânica contido no solo ($2,37 \text{ dag kg}^{-1}$), foram suficientes para suprir a necessidade da cultura para vegetação, produção e para compensar as perdas do nutriente por volatilização. Sendo assim, mesmo os fertilizantes que apresentaram baixo aproveitamento de N mantiveram os teores de N na folha dentro do ideal conforme recomendação de Mallavolta (1992). Estudando adubação nitrogenada no cafeeiro, trabalhando com doses de 100 a 400 kg ha^{-1} de N, não encontraram diferenças significativas nos teores foliares da menor para a maior dose.

Foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$) no teor foliar de enxofre entre os fertilizantes avaliados e nos respectivos parcelamentos da adubação nitrogenada (Tabela 8).

Tabela 8 - Teor de Enxofre (g kg^{-1}) na folha de cafeeiro, após aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Teor foliar de S (g kg^{-1})			Média	CV (%)
	60 dias após 1 ^a	60 dias após 2 ^a	60 dias após 3 ^a		
Ureia	2,86 aA	2,92 bA	2,90 aA	2,89 a	13,76
Ureia dissolvida	2,45 aA	2,87 bA	2,72 bA	2,68 b	10,12
Sulfato de amônio	2,98 aA	3,34 aA	2,98 bA	3,10 a	11,38
Nitrato de amônio	2,36 aA	2,68 bA	2,44 aA	2,49 b	7,55
Ureia + cobre + boro	2,60 aA	2,76 bA	2,32 bA	2,56 b	7,97
Ureia + polímero aniônico	2,51 aA	2,92 bA	3,05 aA	2,83 a	9,96
Ureia + NBPT	2,58 aA	3,11 aA	3,24 aA	2,97 a	8,14
Ureia + S ⁰ + polímero	2,61 aB	3,45 aA	3,40 aA	3,16 a	5,29
Ureia + resina	2,52 aA	2,74 bA	2,69 bA	2,65 b	8,79
Ureia formaldeído	2,94 aB	3,35 aA	3,10 aB	3,13 a	2,40
Ureia + polímero insolúvel em água	2,65 aB	3,05A	3,03 aA	2,91 a	5,13
Média	2,64	3,02	2,90	2,85	
Faixa crítica*	1,6 a 2,2	1,8 a 2,6	2,1 a 2,4	1,8 a 2,0	
Coefficiente de variação (CV)	10,42	8,51	7,79	5,59	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

*Faixa crítica recomendada por Mallavolta (1992).

Fonte: Dados do autor (2018)

Após 60 dias da primeira adubação, os níveis de S na folha variaram de 2,36 a 2,98 g kg^{-1} sem diferença estatística ($p < 0,05$) entre os tratamentos, no entanto o maior valor foi obtido onde foi realizada a adubação com sulfato de amônio e o menor dado para o nitrato de amônio.

No segundo diagnóstico nutricional realizado 60 dias após a segunda adubação, mostraram-se maiores teores de S para o Sulfato de amônio, Ureia + S⁰ + polímero, ureia formaldeído e ureia + NBPT.

Para o terceiro parcelamento da adubação, foram observados os maiores teores de S na folha para a ureia convencional, nitrato de amônio, ureia + polímero aniônico, ureia + NBPT, Ureia + S⁰ + polímero, ureia formaldeído e ureia + polímero insolúvel em água sem diferença estatística entre si.

Na média das três adubações, conforme visto na Tabela 6, o teor de S na folha apresentou a ordem decrescente: Ureia + S⁰ + polímero = ureia formaldeído = sulfato de amônio = ureia + polímero insolúvel em água = ureia + NBPT = ureia convencional = ureia + polímero aniônico > ureia dissolvida em água = ureia + resina plástica = ureia + cobre + boro = nitrato de amônio.

Os fertilizantes sulfato de amônio e Ureia + S⁰ + polímero apresentaram teores de S na folha superiores a outros tratamentos por haver em sua constituição o macronutriente enxofre. Sendo assim, além do N aplicado, esses fertilizantes suprem também a necessidade dos cafeeiros por S.

Todos os fertilizantes avaliados, mesmo os que apresentaram os menores teores de S, ficaram dentro ou até mesmo um pouco a cima do teor indicado como ideal por Mallavolta (1992).

Para o boro foram observadas diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre os tratamentos e, também, variação entre as épocas de cada adubação. Na média dos três parcelamentos, foram observados em ordem decrescente: Ureia + cobre + boro = Ureia + polímero aniônico = Ureia + polímero insolúvel em água = Ureia formaldeído > Ureia + NBPT = Ureia dissolvida = Ureia > Nitrato de amônio = Ureia + resina plástica = Ureia + S⁰ + polímero > Sulfato de amônio (Tabela 9).

Na primeira adubação, a ureia + cobre + boro apresentou o maior teor de B na folha (64,9 mg kg⁻¹). Por ser o único fertilizante a apresentar o micronutriente boro na sua constituição, a ureia estabilizada com cobre e boro apresentou com superioridade os teores do elemento na folha, podendo ser colocada como um diferencial a mais do fertilizante, além da redução na volatilização de amônia que também supre a necessidade do micronutriente.

A segunda adubação avaliada apresentou a ordem decrescente: Ureia + polímero aniônico = Ureia + cobre + boro = Ureia + NBPT = Ureia formaldeído > Ureia + polímero insolúvel em água = Ureia + resina plástica = Ureia + S⁰ + polímero = Ureia dissolvida = nitrato de amônio = Ureia = Sulfato de amônio.

Foi observado que, na segunda adubação, os teores de B estavam mais elevados e, no terceiro parcelamento, maiores que o primeiro, praticamente todos os fertilizantes seguiram esta tendência. O B é um micronutriente imóvel dentro da planta, sendo assim, o suprimento da demanda do micronutriente deve acontecer frequentemente pelo solo. Quando foi realizada a segunda adubação, em decorrência das chuvas regulares do período (Figura 5c), a umidade do solo favoreceu o suprimento constante do elemento às plantas, o que, em condições restritas de umidade isso não ocorre, já que o nutriente é absorvido por fluxo de massa. Na falta de umidade, a planta absorve menos boro e o nutriente que está na folha velha não é redistribuído para tecidos mais jovens pela sua imobilidade (FAQUIN, 2005).

Tabela 9 - Teor de Boro (mg kg^{-1}) na folha de cafeeiro, após aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Teor foliar de B (mg kg^{-1}) após as adubações				CV (%)
	60 dias após 1 ^a	60 dias após 2 ^a	60 dias Após 3 ^a	Média	
Ureia	55,5bB	67,4bA	63,1aA	61,7b	3,8
Ureia dissolvida	51,2bB	69,4bA	66,4aA	62,3b	2,3
Sulfato de amônio	45,6cB	62,6bA	50,3cB	52,8d	4,6
Nitrato de amônio	47,1cC	68,7bA	60,8bB	58,9c	2,4
Ureia + cobre + boro	64,9aB	76,8aA	67,8aB	69,7a	3,9
Ureia + polímero aniônico	51,1bC	78,4aA	69,9aB	66,5a	4,4
Ureia + NBPT	54,0bA	74,8aA	63,2aA	64,0b	5,8
Ureia + S ⁰ + polímero	47,1cB	70,0bA	53,0cB	56,7c	7,0
Ureia + resina plástica	45,7cB	70,0bA	58,8bA	56,9c	8,3
Ureia formaldeído	52,8bB	72,2aA	71,8aA	65,6a	8,7
Ureia + polímero insolúvel em água	52,0bB	71,3bA	75,1aA	66,4a	6,1
Média	51,6	70,7	63,6	62,0	
Faixa crítica*	40 a 80				
Coefficiente de Variação (CV)	4,3	4,0	7,8	3,3	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

*Faixa crítica recomendada por Mallavolta (1992).

Fonte: Dados do autor (2018)

Todos os fertilizantes avaliados apresentaram teores de boro na folha dentro da faixa crítica recomendada por Malavolta (1992), mostrando que a reserva do solo pela Matéria Orgânica ($2,43 \text{ dag kg}^{-1}$ - Tabela 1) foi suficiente para suprir a necessidade das plantas, mesmo sem adubação com o micronutriente.

Para o cobre, conforme apresentado na Tabela 10, nenhum tratamento ficou abaixo da faixa crítica recomendada por Malavolta (1992). A média das três adubações se apresentou do maior teor para o menor: ureia > ureia dissolvida = Ureia + cobre + boro = Ureia + NBPT > Ureia + S⁰ + polímero = Nitrato de amônio = Ureia formaldeído = Ureia + polímero aniônico > Sulfato de amônio = Ureia + resina plástica.

No tratamento que recebeu a ureia + cobre + boro não foi observada diferença nos teores de cobre para os demais tratamentos que não apresentam cobre na sua composição. A aplicação de cobre via solo não influencia no teor nutricional, porque o elemento no solo é complexado muito facilmente à matéria orgânica, tornando-se indisponível às plantas. Assim, a melhor forma de suprir o cobre às plantas é via foliar, conforme foi visto na segunda adubação da Tabela 8, que com uma única aplicação foliar de fungicida cúprico, elevou os níveis a cima do recomendado para a cultura.

Tabela 10 - Teor de Cobre (mg kg^{-1}) na folha de cafeeiro, após aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Teor foliar de Cu (mg kg^{-1}) após as adubações				CV (%)
	60 dias após 1 ^a	60 dias após 2 ^a	60 dias após 3 ^a	Média	
Ureia	15,6bB	36,6aA	13,6aB	21,9a	18,5
Ureia dissolvida	18,5aA	24,3bA	14,7aA	19,2b	14,2
Sulfato de amônio	13,7cB	20,6bA	11,0aB	15,2d	12,0
Nitrato de amônio	14,2cA	24,8bA	13,0aA	17,3c	29,4
Ureia + cobre + boro	15,7bB	28,0bA	13,8aB	19,9b	6,7
Ureia + polímero aniônico	14,3cB	22,2bA	14,0aB	16,6c	11,6
Ureia + NBPT	15,3bB	26,2bA	14,0aB	18,5b	14,6
Ureia + S ⁰ + polímero	13,3cB	24,7bA	14,3aB	17,4c	19,4
Ureia + resina plástica	11,9cB	19,6bA	11,0aB	14,2d	7,6
Ureia formaldeído	12,9cB	24,9bA	12,9aB	16,9c	14,3
Ureia + polímero insolúvel em água	14,0cB	25,4bA	15,3aB	18,2b	9,1
Média	14,5	25,2	13,4	17,7	
Faixa crítica*	10 a 20				
Coefficiente de variação (CV)	10,1	13,7	10,9	8,2	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

*Faixa crítica recomendada por Malavolta (1992).

Fonte: Dados do autor (2018)

4.4 Produtividade

Foi observada diferença significativa ($p \leq 0,05$) para a produtividade entre os tratamentos, conforme dados apresentados na Tabela 11. A produtividade variou de 46,8 sacas beneficiadas por hectare até 69,2 sacas. A maior média foi obtida pela ureia dissolvida em água e a menor média para o nitrato de amônio.

Em ordem decrescente de produtividade apresenta-se da seguinte maneira: ureia dissolvida = ureia + resina plástica = ureia + NBPT = ureia + polímero aniônico = ureia = ureia + S⁰ + polímero = sulfato de amônio = ureia + polímero insolúvel em água > ureia + cobre + boro = ureia formaldeído = nitrato de amônio (Tabela 11).

Tabela 11 - Produtividade do cafeeiro (sacas de 60 kg ha⁻¹) submetido à aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Produtividade (sacas ha ⁻¹)
Ureia	64,3 a
Ureia dissolvida	69,2 a
Sulfato de amônio	60,9 a
Nitrato de amônio	46,8 b
Ureia + cobre + boro	53,5 b
Ureia + polímero aniônico	65,9 a
Ureia + NBPT	66,8 a
Ureia + S ⁰ + polímero	63,4 a
Ureia + resina plástica	67,9 a
Ureia formaldeído	51,6 b
Ureia + polímero insolúvel em água	60,5 a
Média	61,0
Coeficiente de variação	7,7

Nota: As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

Fonte: Dados do autor (2018)

Não foi observada uma relação entre a quantidade de N perdido por volatilização com a produtividade, ou seja, os tratamentos que apresentaram grandes perdas por volatilização não tiveram a produtividade afetada. A ureia convencional e ureia + polímeros aniônicos apresentaram 26,5% e 29,8% de perdas do fertilizante aplicado (Tabela 5) e produtividade de 64,3 e 65,9 sacas, respectivamente. Já o nitrato de amônio e ureia formaldeído apresentaram perdas de N de 0,47% e 0,34% (Tabela 5) e produtividade de 46,8 e 51,6 sacas ha⁻¹ (Tabela 11).

No presente trabalho, notou-se que a volatilização da amônia não influenciou na produtividade da cultura. Outros autores relataram que a volatilização de nitrogênio na forma de NH₃ não limita a produção (CHAGAS et al., 2016; CUNHA et al., 2011; RODRIGUES et al., 2016). Isso pode ser explicado, por que a quantidade de N aplicado nas adubações foram além do suficiente para as plantas vegetarem e produzirem e, o excedente aplicado foi volatilizado nos fertilizantes convencionais; por outro lado, o que não volatilizou dos fertilizantes de tecnologias de retardamento da volatilização foi pouco aproveitado pela cultura. Além do mais, também deve ser contabilizada a reserva de N no solo contido na matéria orgânica, pois o suprimento de N, em solos com fertilidade construída, é de médio a alto, assim, o nitrogênio presente no solo compensa o que foi perdido por volatilização nos fertilizantes convencionais, proporcionando boa produtividade para a cultura.

Outros pesquisadores não encontraram aumento na produtividade do cafeeiro quando submetido à adubação com fertilizantes nitrogenados de liberação lenta ou controlada (DOMINGHETI, 2016, RODRIGUES et al., 2016). Ainda diferentes autores, trabalhando com outras culturas também não encontraram incrementos na produtividade, mesmo observando

grandes volatilizações nos fertilizantes convencionais (FONTORA e BAYER, 2010; FRANÇA et al, 2011).

Avaliando a eficiência da ureia formaldeído em adubação na cultura do café, pesquisadores concluíram que esta é uma boa ferramenta em substituição aos fertilizantes convencionais; mesmo não apresentando incremento na produção, os autores observaram a possibilidade de reduzir o número de parcelamento e diminuir a quantidade de N em até 40% com a utilização da tecnologia. Outros autores, trabalhando com fertilizantes de liberação lenta ou controlada encontraram incremento na produtividade do cafeeiro (PAIVA et al., 2011). Pesquisando volatilização de amônia na cultura do milho, Silva (2016) também observou respostas positivas na produtividade para os fertilizantes com tecnologias para controlar a volatilização.

Independente da fonte utilizada, as culturas são muito responsivas à adubação nitrogenada, mediante a importância do nutriente às plantas que de todos os elementos é o exigido em maior quantidade. Cancellier, (2013) observou um aumento linear na produtividade de milho, à medida que se adicionou nitrogênio na adubação. Outros autores relataram incremento na produtividade quando aumentou a dose de N (SILVA, et al., 2011; FRANÇA et al., 2011; COSTA et al., 2012)

As diferenças entre as produtividades proporcionadas pelos fertilizantes foram mínimas, no entanto, a relação entre a produtividade e a quantidade de nitrogênio aplicado foi bastante contrastante entre os tratamentos (Tabela 12).

Deduzindo as perdas por volatilização, os fertilizantes que apresentaram a maior eficiência quanto ao nitrogênio efetivamente aproveitado, considerando que foram aplicados 300 kg de N em todos os tratamentos, foram em ordem decrescente: Ureia formaldeído (298,99) = Nitrato de amônio (298,60) = Sulfato de amônio (298,17) > Ureia dissolvida (287,66) = Ureia + polímero insolúvel em água (286,21) = Ureia + S⁰ + polímero (283,07) = Ureia + resina plástica (283,07) > Ureia + NBPT (249,88) > Ureia + cobre + boro (237,58) > Ureia (223,29) > Ureia + polímero aniônico (208,97).

Os fertilizantes que proporcionaram as maiores médias de produção (kg de café) para cada kg de N efetivamente aproveitado foram: Ureia + polímero aniônico (19,03) = Ureia (17,34) > Ureia + NBPT (15,23) = Ureia dissolvida (14,44) = Ureia + S⁰ + polímero (14,40) = Ureia + resina plástica (14,21) > Ureia + cobre + boro (13,50) = Ureia + polímero insolúvel em água (12,68) = Sulfato de amônio (12,25) > Ureia formaldeído (10,36) = Nitrato de amônio (9,40).

Para cada saca de café de 60 kg, foi consumida a quantidade (kg) de nitrogênio efetivo: Nitrato de amônio (6,42) = Ureia formaldeído (5,80) = Sulfato de amônio (4,94) = Ureia + polímero insolúvel em água (4,75) = Ureia + cobre + boro (4,52) > Ureia + resina plástica (4,23) = Ureia dissolvida (4,17) = Ureia + S⁰ + polímero (4,17) = Ureia + NBPT (3,95) > Ureia (3,49) = Ureia + polímero aniônico (3,16).

Tabela 12 - Relação entre a produtividade e a quantidade de nitrogênio efetivamente utilizado pela cultura (considerando apenas as perdas por volatilização) para produzir 60 kg de café beneficiado.

Fertilizantes	kg de N efetivo ¹	kg de café por kg de N efetivo ²	kg de N efetivo por saca ³
Ureia	223,29 e	17,34 a	3,49 d
Ureia dissolvida	287,66 b	14,44 b	4,17 c
Sulfato de amônio	298,17 a	12,25 c	4,94 b
Nitrato de amônio	298,60 a	9,40 d	6,42 a
Ureia + cobre + boro	237,58 d	13,50 c	4,52 b
Ureia + polímero aniônico	208,97 f	19,03 a	3,16 d
Ureia + NBPT	249,88 c	15,23 b	3,95 c
Ureia + S ⁰ + polímero	283,07 b	14,40 b	4,17 c
Ureia + resina plástica	283,07 b	14,21 b	4,23 c
Ureia formaldeído	298,99 a	10,36 d	5,80 a
Ureia + polímero insolúvel em água	286,21 b	12,68 c	4,75 b
Média	268,53	13,89	4,51
Coefficiente de variação	1,77	8,61	8,24

Nota: As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

¹Dado obtido da subtração da quantidade de nitrogênio aplicado (300kg) pela quantidade de nitrogênio volatilizado (Tabela 5). ²Produção estimada em kg ha⁻¹ dividida pelo nitrogênio efetivo. ³Obtido pela divisão do nitrogênio efetivo pela quantidade de sacas produzidas (Tabela 11).

Fonte: Dados do autor (2018)

A ureia formaldeído e nitrato de amônio apresentaram poucas perdas do N aplicado por volatilização (0,34 e 0,47%), sendo assim, apresentaram as maiores quantidades de N efetivamente aproveitado, no entanto as suas médias de produtividade no ensaio ficaram inferiores aos demais (51,60 e 46,77 sacas ha⁻¹), o que resultou em menores quantidades de café produzido para cada kg de N aplicado (10,36 e 9,40 kg de café, respectivamente). Em contrapartida, a ureia + polímeros aniônicos e Ureia convencional, foram os fertilizantes que apresentaram as maiores perdas de NH₃ (30,64 e 25,57%), toda via a produção foi de 65,93 e 64,33 sacas respectivamente, o que resultou nas melhores produtividades para cada kg do N efetivamente aproveitado (19,03 e 17,34 kg de café para cada kg de N).

Deve-se levar em consideração, que no presente trabalho foram contabilizadas somente as perdas por volatilização, outras formas de perdas do nitrogênio como lixiviação,

desnitrificação ou N retido na matéria orgânica por microorganismos, não foram contabilizados. Considerando todas estas possíveis perdas do elemento, os valores reais da quantidade de N efetivamente aproveitado ou a produção de café para cada kg de N aplicado devem ser levemente alterados.

4.5 Resultados obtidos no experimento de 2013 a 2017 - Dados compilados de Dominghetti (2016) e Freitas (2017)

Os dados apresentados na Tabela 13 são referentes aos resultados encontrados no ensaio durante quatro safras. Os resultados das safras 2013/2014 e 2014/2015 foram compilados da tese de doutorado de Dominghetti (2016), apresentado ao Departamento de Agricultura (DAG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Dando continuidade à pesquisa, os dados da safra de 2015/2016 foram parte da Dissertação de Mestrado de Freitas (2017), também no DAG – UFLA. Para finalizar o experimento e obter dados mais consistentes quanto ao uso de fertilizantes nitrogenados no cafeeiro, a presente dissertação continuou os trabalhos dos autores citados, obtendo dados para a safra 2016/2017.

Foi observado na pesquisa que o fator determinante da quantidade de nitrogênio ($N-NH_3$) perdido para a atmosfera é o volume de precipitação ocorrido logo após a aplicação do fertilizante. As menores perdas foram observadas quando ocorreram precipitações volumosas (superiores a 30mm), até o terceiro dia após a adubação. Em 2013/2014, na segunda adubação nitrogenada, as perdas foram menores (22% para ureia) pelo fato de a precipitação de 165mm ter ocorrido até o 5º dia após a aplicação (DOMINGHETTI, 2016). Na safra 2014/2015, no terceiro parcelamento do N, foram observadas as menores perdas (22% para ureia convencional), em que ocorreu precipitação de 70 mm até o 7º dia após a adubação (DOMINGHETTI, 2016). Na terceira safra, a menor perda da ureia convencional ocorreu na segunda adubação (13,7%), na qual houve precipitação de 171 mm nos seis primeiros dias após a aplicação do nitrogênio (FREITAS, 2017). Na safra 2016/2017, foi encontrada a menor perda no segundo parcelamento do N, com cerca de 21% de perda, de amônia para a ureia convencional e precipitação de 75 mm até o 6º dia (Tabela 3).

A maior perda de nitrogênio ocorreu na segunda adubação da safra 2014/2015. Cerca de 55% do N foi perdido via $N-NH_3$, em que se observou um período de 13 dias sem chuva após a aplicação dos fertilizantes (DOMINGHETTI, 2016).

Foi observado, durante os quatro anos da pesquisa, que os fertilizantes convencionais, sulfato de amônio e nitrato de amônio, independente das condições climáticas, tiveram as perdas de N baixas em comparação com outros fertilizantes. Outro fertilizante que apresentou comportamento semelhante foi a ureia formaldeído, com perdas mínimas, em qualquer condição de clima, por causa da cadeia carbônica que protege o nitrogênio depender mais da ação de microorganismos para sua degradação do que da umidade do solo.

Em todo período avaliado, a ureia + polímeros aniônicos apresentou perda de N superior até mesmo que a ureia convencional. Explica-se esse fato por polímeros presentes nos grânulos de ureia que são facilmente solubilizados pela água, assim, a ureia fica imediatamente exposta à hidrólise. Os polímeros aniônicos, impedem o processo de nitrificação, fazendo com que o N permaneça por mais tempo na forma amoniacal, o que aumenta as perdas deste fertilizante em comparação com a ureia aplicada sem adição do polímero.

Uma alternativa ao cafeicultor para uso de fertilizante nitrogenado de forma eficiente é a aplicação da ureia diluída em água (50 g L⁻¹), o que, na média de quatro anos, proporcionou uma redução de 85% das perdas comparada com a ureia convencional. A ureia diluída se destacou por ser mais eficiente que fertilizantes de liberação lenta ou controlada como a ureia + polímeros insolúveis, ureia + resina e Ureia + S⁰ + polímeros. Uma grande vantagem da utilização da ureia convencional diluída em água é o seu baixo custo quando comparada aos fertilizantes com tecnologias agregada ao produto, seja ela proteção química, física ou biológica.

A aplicação da ureia com NBPT promoveu uma redução de 43,7 % nas perdas de N em comparação com a ureia convencional. Resultado semelhante foi encontrado para a ureia + cobre + boro, com cerca de 40% menos de perdas. Os fertilizantes com inibidor de urease, ureia + NBPT e ureia + cobre + boro mostraram ser eficientes na retenção das perdas de amônia. No entanto, estes fertilizantes estabilizados não devem ser aplicados, quando o solo estiver úmido, porque a umidade faz com que a ureia inicie rapidamente o processo de hidrólise, fazendo com que a proteção dos íons metálicos Cu e B ou da molécula de NBPT percam sua eficiência rapidamente.

Tabela 13 - perdas acumuladas de N-NH₃ (% do aplicado), para fertilizantes de liberação lenta ou controlada, estabilizados e convencionais aplicados na cultura do cafeeiro de 2013 a 2017, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Ano - Safra				Média	⁴ Total N perdido (kg ha ⁻¹)
	¹ 2013/2014	¹ 2014/2015	² 2015/2016	³ 2016/2017		
Ureia	31,2bB	38,4aA	23,0bC	25,5bC	29,5b	442,5b
Ureia dissolvida	4,6eA	5,3dA	3,3eA	4,1eA	4,4e	65,5e
Sulfato de amônio	0,9fA	0,6dA	0,2fA	0,6fA	0,6f	9,5f
Nitrato de amônio	0,3fB	0,2dB	0,2fB	0,5fA	0,4f	5,9f
Ureia + cobre + boro	25,6cA	17,1cB	6,8dC	20,8cB	17,7c	265,5c
Ureia + polímero aniônico	35,8aA	40,9aA	24,9aB	30,6aB	33,0a	495,6a
Ureia + NBPT	11,9dC	26,0bA	12,1cC	16,7dB	16,6c	249,6c
Ureia + S ⁰ + polímero	30,9bA	28,8bA	4,3eB	5,6eB	17,5c	262,1c
Ureia + resina	8,6dB	14,5cA	6,5dB	5,9eB	8,9d	133,6d
Ureia formaldeído	1,1fA	0,6dB	0,5fB	0,3fB	0,7f	10,8f
Ureia + polímero insolúvel*	-	-	6,1d	4,6e	5,4e	80,5e
Média	15,1 B	17,2 A	7,99 D	10,5 C	12,6	183,7
Coeficiente de variação	13,1	16,6	11,9	15,0	8,7	8,7
Precipitação (mm)	954	1087	1372	857	1068	

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

⁴Total em kg de Nitrogênio perdido, durante quatro anos, que foram aplicados 1500 kg ha⁻¹ de N no período.

*O tratamento ureia + polímero insolúvel em água foi aplicado somente nas safras 2015/2016 e 2016/2017.

Nota: Nas safras 2013/2014 e 2014/2015, foram aplicados 450 kg de N/ano e nas safras 2015/2016 e 2016/2017, foram aplicados 300 kg de N/ano.

¹ Dados de Dominghetti (2016)

² Dados de Freitas (2017)

³ Dados do autor (2018)

De modo geral, os fertilizantes apresentaram comportamento distintos entre si ($p < 0,05$) na média das quatro safras. Os fertilizantes convencionais apresentaram-se em ordem decrescente de perdas por volatilização do total aplicado: ureia convencional (29,5%) > ureia dissolvida em água (4,4%) > sulfato de amônio = nitrato de amônio. Os fertilizantes estabilizados, com tecnologia capaz de reduzir a atividade da urease, mostraram a relação de perdas de N-NH₃: ureia + polímero aniônico (33%) > ureia + cobre + boro (17,7%) = ureia + NBPT (16,6%). Já os fertilizantes nitrogenados de liberação lenta ou controlada apresentaram: ureia + S⁰ + polímero (17,5%) > ureia + resina (8,9%) > ureia + polímero insolúvel em água (5,4%) > ureia formaldeído (0,7%).

Foi observado para o tratamento ureia + S⁰ + polímero, que o seu parcelamento não é viável. Nos dois primeiros anos, tal fertilizante foi aplicado em três parcelamentos e, resultou em perdas de 30,9% e 28,8%, respectivamente. Já nas duas últimas safras os fertilizantes de

liberação lenta ou controlada foram aplicados em parcelamento único e, no tratamento ureia + S^o + polímero, foi encontrada volatilização de 4,3% na safra 2015/2016 e 5,6% na safra 2016/2017.

Durante os quatro anos de condução do experimento, foram aplicados 1500 kg ha⁻¹, sendo 450 kg nos dois primeiros anos e 300 kg nas duas últimas safras. Para os fertilizantes convencionais e estabilizados, os 1500 kg do nutriente foram divididos em 12 aplicações no período (3 por ano) e os fertilizantes de liberação lenta ou controlada 8 aplicações (2 safras com 3 parcelamentos e 2 safras com 1 parcelamento). Do total de N aplicado, os fertilizantes apresentaram a ordem decrescente de perdas: ureia + polímero aniônico (495,6kg) > ureia convencional (442,5kg) > ureia + cobre + boro (265,5kg) = ureia + S^o + polímero (262,1kg) = ureia + NBPT (249,6kg) > ureia + resina (133,6kg) > ureia + polímero insolúvel em água (80,5kg) = ureia dissolvida em água (65,5kg) > ureia formaldeído (10,8kg) = sulfato de amônio (9,5kg) = nitrato de amônio (5,9kg) (Tabela 13).

Durante os quatro anos de condução do experimento, mensurou-se a produtividade dos cafeeiros, em sacas beneficiadas por ha, em que os fertilizantes nitrogenados apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo teste estatístico a que foram submetidos, conforme dados esboçados na Tabela 14.

Tabela 14 - Produtividade em quatro safras (sacas de 60 kg ha⁻¹), de cafeeiro submetido à aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada, em Lavras – MG.

Fertilizantes	Ano da produção				Média 4 safras
	¹ 2014	¹ 2015	¹ 2016	² 2017	
Ureia	41 aB	15 bC	30 aB	64 aA	38 a
Ureia dissolvida	43 aB	22 aC	22 bC	69 aA	39 a
Sulfato de amônio	51 aB	24 aC	27 aC	61 aA	41 a
Nitrato de amônio	41 aA	11 aB	39 aA	47 bA	35 b
Ureia + cobre + boro	34 aB	9 bC	20 bC	54 bA	29 b
Ureia + polímero aniônico	50 aA	24 aB	29 aB	66 aA	42 a
Ureia + NBPT	42 aB	20 aC	21 bC	67 aA	37 a
Ureia + S ^o + polímero	45 aB	24 aC	14 bD	63 aA	37 a
Ureia + resina plástica	45 aB	25 aC	25 bC	68 aA	41 a
Ureia formaldeído	41 aB	23 aC	17 bC	52 bA	33 b
Média	43	20	24,7	61	37
Coefficiente de variação	17,4	31,4	24,72	7,71	9,79

Nota: As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p \leq 0,05$).

¹ Dados de Dominghetti (2016)

² Dados do autor (2018)

Na média de quatro safras, os fertilizantes apresentaram a ordem decrescente de produtividade (sacas ha^{-1}): ureia + polímero aniônico (42) = sulfato de amônio (41) = ureia + resina (41) = ureia dissolvida (39) = ureia convencional (38) = ureia + NBPT (37) = ureia + S^0 + polímero (37) > nitrato de amônio (35) = ureia formaldeído (33) = ureia + cobre + boro (29).

A produtividade do cafeeiro não foi afetada pela volatilização do N, pois fertilizantes que apresentaram alta taxa de perdas, como a ureia convencional e ureia + polímero aniônico (Tabela 13), atingiram produção semelhante aos demais adubos nitrogenados. De acordo com os resultados de quatro anos de pesquisa, trabalhando com a dose de 300 a 450 kg ha^{-1} de N, concluíram que pode haver perdas de até 33% do nutriente, pois a quantidade do elemento efetivamente aproveitada é suficiente para suprir a demanda da planta tanto para formação da área vegetativa quanto para formação dos frutos, sem causar prejuízos na produtividade. Considerando que a produtividade média do experimento foi de 37 sacas ha^{-1} , em lavouras com maior potencial produtivo, a dose de N necessária deve ser reconsiderada.

5 CONCLUSÕES

Nas condições em que o experimento foi conduzido, os fertilizantes nitrogenados de liberação lenta ou controlada e os fertilizantes nitrogenados estabilizados não apresentaram aumento de produtividade, na cultura do cafeeiro, mesmo apresentando maior aproveitamento do N aplicado em comparação com a ureia convencional.

Foi observada uma relação entre o melhor aproveitamento de N com o maior teor do elemento no tecido foliar, no entanto, todos os fertilizantes avaliados apresentaram teores de N dentro da faixa crítica da cultura.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados, na cultura do cafeeiro, promove redução do pH do solo na camada superficial, com redução em maior intensidade, dependendo da fonte de N utilizada.

A menor quantidade de nitrogênio, efetivamente aproveitado pelo cafeeiro, levando em consideração somente as perdas por volatilização de $N-NH_3$, foi observada para a ureia + polímeros aniônicos e ureia convencional, já o melhor aproveitamento foi para o nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído.

6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com a presente pesquisa, nota-se um significativo ganho econômico, em se utilizar fontes de fertilizantes nitrogenados mais eficientes, por haver melhor aproveitamento do nutriente aplicado pela cultura. No entanto, em relação ao meio ambiente, os benefícios de se utilizar fertilizantes nitrogenados com tecnologias que reduzem a volatilização de $N-NH_3$ são ainda maiores, pois há menor emissão de gases poluentes para a atmosfera, principalmente, o CO_2 .

O fertilizante convencional mais eficiente, com baixa perda de $N-NH_3$ após a aplicação, é o nitrato de amônio, podendo ser aplicado em solo seco. Por sua maior eficiência, o kg de N, efetivamente aproveitado pela cultura, é mais barato na forma de nitrato de amônio do que na forma de ureia.

Dos fertilizantes estabilizados, o mais eficiente é a areia recoberta com NBPT, apresentando melhor aproveitamento que a ureia convencional. No entanto, deve-se evitar a sua aplicação sob solo úmido e temperatura elevada, o que pode reduzir sua eficiência.

O fertilizante de liberação lenta, ureia formaldeído, apresenta um bom aproveitamento do N aplicado, com baixa volatilização de $N-NH_3$. Para tomar a decisão de utilizar a ureia formaldeído, deve-se calcular o custo benefício, ficando atento ao custo do produto no mercado e compará-lo ao preço de fontes com aproveitamento semelhante, conforme apresentado nesta pesquisa e, ainda, levar em consideração para o cálculo, que este é um produto de aplicação única, reduzindo um pouco o custo com aplicação.

Conforme relatado na presente dissertação, uma alternativa de adubação nitrogenada, para o cafeeiro, de custo reduzido e alta eficiência, é a aplicação da ureia convencional diluída em água. Com os dados apresentados, observou-se que a eficiência da aplicação da ureia diluída em água, é semelhante aos fertilizantes de liberação lenta ou controlada, e superior aos fertilizantes estabilizados. A ureia convencional apresenta o menor custo de compra, em relação a outros fertilizantes avaliados, no entanto, quando se divide a quantidade de nitrogênio efetivamente aproveitado pelo valor pago à tonelada do fertilizante, o N na forma de ureia acaba saindo mais caro que outras fontes mais eficientes. Sendo assim, a aplicação da ureia diluída em água, apresenta um dos melhores custo-benefício, pois aumenta a eficiência da ureia, o que torna o kg de N, na forma de ureia e aplicado diluída em água, em um dos fertilizantes viáveis ao cafeicultor, porém ainda deve ser calculado o custo de aplicação, que pode ser superior à forma tradicional.

REFERÊNCIAS

- ADOTEY, N. et al. Ammonia volatilization of zinc sulfate-coated and NBPT-Treated urea fertilizers. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, N. 6, p. 2918-2926, Sept. 2017.
- AZEEM, B. et al. Review on materials and methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, Amsterdam, v. 181, p. 11-21, May 2014.
- BENINI, S. et al. Molecular details of urease inhibition by boric acid: insights into the catalytic mechanism. **Journal of the American Chemical Society**, Easton, v. 126, n. 12, p. 3714-3715, Mar. 2004.
- BYRNES, B. H. Liquid fertilizers and nitrogen solutions. In: INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER. **Fertilizer manual**. Alabama: Kluwer Academic, 2000. p. 20-44.
- CANCELLIER, E. L. **Eficiência da uréia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- CANTARELLA, H. et al. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397-401, jul./ago. 2008.
- _____. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em sistema de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 7., Londrina, 1999. **Anais...** Londrina: STAB, 1999. p. 82-87.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.
- CHAGAS, W. F. T. et al. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 497-509, set./out. 2016.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Levantamentos de safra: 1º levantamento da safra café: safra 2017/2018**. Brasília: CONAB, 2018. 22 p.
- CONTIN, T. L. M. **Ureia tratada com o inibidor da urease NBPT na adubação de cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo**. 2007. 69 p. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) - Instituto Agrônomo, Campinas, 2007.
- COSTA, A. C. S. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em três solos argilosos tratados com uréia. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 4, p. 467-473, out. 2008.
- COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 631-637, ago. 2003.

COSTA, N. R. et al. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1038-1047, ago. 2012.

CUNHA, P. C. R. et al. Fontes, formas de aplicação e doses de nitrogênio em feijoeiro irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 80-86, jan./mar. 2011.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, dez. 2007.

DAWAR, K. et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, n. 2, p. 139-146, Feb. 2011.

DOMINGHETTI, A. W. et al. Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 2, p. 173-183, mar./abr. 2016.

DOMINGHETTI, A. W. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro**. 2016. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Ed. UFLA/FAEPE, 2005. 186 p.

FARIA, L. A. et al. Hygroscopicity and ammonia volatilization losses from nitrogen sources in coated urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 942-948, maio/jun. 2014.

_____. Loss of ammonia from nitrogen fertilizers applied to maize and soybean straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 969-975, jul./ago. 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the state of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1677-1684, set./out. 2010.

FRANÇA, S. et al. Nitrogênio disponível ao milho: crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 11, p. 1143-1151, nov. 2011.

FREITAS, T. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada na cultura do cafeeiro: eficiência e custos.** 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

GALLO, P. B. et al. Resposta de cafezais adensados à adubação NPK. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 2, p. 341-351, 1999.

GOMES, C. A. et al. Fertilizante de liberação gradativa em cafeeiros em produção. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 2, n. 2, p. 35-39, jun. 2011.

GROHS, M. et al. Resposta do arroz irrigado ao uso de inibidor de urease em plantio direto e convencional. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 336-345, mar./abr. 2011.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação.** Viçosa: Ed. UFV, 1999. p. 289-302.

HARGROVE, W. L. Soil, environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. In: BOCK, B. R.; KISSEL, D. E. (Ed.). **Ammonia volatilization from urea fertilizers.** Alabama: NFDC, 1988. chap. 2, p. 17-36.

HERINGER, D. D. **Produto fertilizante a base de uréia e processo para fabricação do produto.** [S.l.: s.n.], 2008. 13 p. PI 0700921-6 A.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. Disponível em: <<http://www.brasil.ipni.net/article/BRS-3132#aparente>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

JANTALIA, C. P. et al. Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, n. 6, p. 1595, Sept. 2012.

KRAJEWSKA, B. Ureases I. functional, catalytic and kinetic properties: a review. **Journal of Molecular Catalysis**, Lausanne, v. 59, n. 1/3, p. 9-21, July 2009.

LADHA, J. K. et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, n. 5, p. 85-156, Oct. 2005.

LARA CABEZAS, W. A. R. et al. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 30, n. 3/4, p. 389-406, 1999.

_____. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p. 1005–1013, jul./ago. 2004.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDÖRFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 481-487, jul./set. 1997.

- LARA CABEZAS, W. A. R.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de ureia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 2343-2353, nov./dez. 2008.
- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124 p.
- _____. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 683 p.
- MAR, G. D. et al. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantina**, Campinas, v. 62, n. 2, p. 267-274, fev. 2003.
- MEDINA, L. C. et al. Nitrogen release patterns of a mixed controlled-release fertilizer and its components. **HortTechnology**, Alexandria, v. 18, n. 3, p. 475-480, 2008.
- MORGAN, K. T.; CUSHMAN, K. E.; SATO, S. Release mechanisms for slow and controlled – release fertilizers and strategies for their use in vegetable production. **HortTechnology**, Alexandria, v. 19, n. 1, p. 10-12, Jan. 2009.
- NASCIMENTO, C. A. C. et al. Ammonia volatilization from coated urea forms. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1057-1063, jul./ago. 2013.
- NAZ, Y. M.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, Amsterdam, v. 225, p. 109-120, Mar. 2016.
- OLIVEIRA, M. W. et al. Volatilização de amônia proveniente da uréia (15N) aplicada em solo cultivado com cana-de-açúcar. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE PÓSGRADUANDOS DO CENA – USP, 3., Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: CENA, 1997. p. 28.
- PAIVA, R. F. et al. Adubação de cafeeiros *Coffea arabica* em produção com fertilizantes de liberação lenta e controlada (Polyblen®) no Sul de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 37., 2011, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SIBCafé, 2011. p. 191-192.
- PEREIRA, H. S. et al. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1685-1694, nov./dez. 2009.
- PRASERTSAK, P. et al. Fate of urea nitrogen applied to a banana crop in the wet tropics of Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 59, n. 1, p. 65-73, Jan. 2001.
- QUEIROZ, A.M. et al. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea Mays L.*). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 10, n. 3, p. 257-266, 2011.
- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Potafos/Ceres, 1991. 285 p.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Ed. UFV, 1999. 359 p.

ROCHETTE, P. et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 42, n. 6, p. 1635-1642, Nov. 2013.

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

SANGOI, L. et al. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687-692, ago. 2003.

SCIVITTARO, W. B. et al. 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**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1283-1289, jun. 2010.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings...** Paris, International Fertilizer Industry Association, 2005. p. 1-15.

SILVA, A. L. **Eficiência agrônômica da ureia estabilizada com inibidores de urease e nitrificação na cultura do milho**. 2016. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

SILVA, D. R. G. et al. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 3, p. 516-523, maio/jun. 2011.

SOUZA, J. A. **Lixiviação de nitrato e volatilização de amônia em um latossolo cultivado com café sob diferentes fontes de nitrogênio**. 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SOUZA, T. L. de. **Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados, emissão de CO₂ e volatilização de NH₃ na cultura do milho**. 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

SOUZA, T. L. de et al. Ammonia and carbon dioxide emissions by stabilized conventional nitrogen fertilizers and controlled release in corn crop. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 5, p. 494-510, set./out. 2017.

STAFANATO, J. B. et al. Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 726-732, maio/jun. 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 722 p.

TAKASHIO, M. et al. **Urease and process for preparation thereof**. [S.l.: s.n.], 1988. US Pat. 4.753.882.

TASCA, F. A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 493-502, abr. 2011.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, Abr. 2014.

TRENKEL, M. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 163 p.

VILLAS BÔAS, R. L. **Recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho**: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação. 1995. 128 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1995.

VITTI, G. C. et al. Influência da mistura de sulfato de amônio com ureia a sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 663-671, jul./set. 2002.

WATSON, C. J. et al. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil use and Management**, Oxford, v. 24, n. 3, p. 246-253, Sept. 2008.

YAMAMOTO, C. F. et al. Slow release fertilizer based on urea/ urea-formaldehyde polymer nanocomposites. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 287, p. 390-397, Mar. 2016.

ZAVASHI, E. **Volatilização de amônia e produtividade do milho em função da aplicação de ureia revestida com polímeros**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Solo e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2010.