



ANDERSON WILLIAM DOMINGHETTI

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE
EFICIÊNCIA AUMENTADA E
CONVENCIONAIS NA CULTURA DO
CAFEEIRO**

LAVRAS – MG

2016

ANDERSON WILLIAM DOMINGHETTI

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA E
CONVENCIONAIS NA CULTURA DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Rubens José Guimarães

Orientador

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva

Coorientador

LAVRAS – MG

2016

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

Dominghetti, Anderson William.

Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e
convencionais na cultura do cafeeiro / Anderson William

Dominghetti. – Lavras : UFLA, 2016.

144 p. : il.

Tese(doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2016.

Orientador: Rubens José Guimarães.

Bibliografia.

1. Volatilização de amônia. 2. Custo de produção do café. 3.
Emissão de CO₂ por fertilizantes nitrogenados. 4. NBPT. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

ANDERSON WILLIAM DOMINGHETTI

**FERTILIZANTES NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA E
CONVENCIONAIS NA CULTURA DO CAFEIRO**

**NITROGEN FERTILIZERS OF INCREASED AND CONVENTIONAL
EFFICIENCY IN COFFEE CULTURE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 29 de julho de 2016

Profª. Dra. Adélia Aziz Alexandre Pozza	UFLA
Prof. Dr. Luiz Gonzaga de Castro Júnior	UFLA
Prof. Dr. Felipe Campos Figueiredo	IFSULDEMINAS
Dr. César Elias Botelho	EPAMIG

Prof. Dr. Rubens José Guimarães
Orientador

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Coorientador

LAVRAS – MG

2016

Aos meus pais,

José Carlos Dominghetti e Rosa Helena Fávaro Dominghetti.

Aos meus irmãos,

Alisson Magno Dominghetti e José Carlos Dominghetti Júnior.

À minha esposa e minha filha,

Marília Vilas Boas Sandi Dominghetti e Ana Luiza Dominghetti

DEDICO

Aos Cafeicultores, do Brasil e do Mundo, maior razão deste trabalho!

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, agradeço por mais esta conquista, pelas forças e perseverança nas lutas do dia a dia.

Agradeço à minha família, pais, irmãos, minha esposa e minha filha pelo apoio incondicional nesta caminhada.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Agricultura, ao Setor de Cafeicultura/INOVACAFÉ e à parceria do Departamento de Ciência do Solo da UFLA (DCS) por todo apoio à concretização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudos e suporte financeiro aos projetos.

Aos meus orientadores, Prof. Rubens e Prof. Douglas, não só pelas orientações e auxílios nos trabalhos, mas por toda amizade que fica.

Aos laboratoristas do Departamento de Ciência de Solo, Roberto e Adalberto, pelos auxílios nas análises e por todo aprendizado durante este tempo.

Aos amigos do Setor de Cafeicultura, José Maurício, Alexandre e Agrimar (em memória) por toda ajuda nos trabalhos de campo e condução do experimento.

Aos amigos e peças fundamentais deste trabalho: estagiários do Departamento de Ciência do Solo, Necaf e da Pós-graduação que dedicaram boas horas de seus tempos para sua concretização.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Marli do Santos Túlio, por toda atenção e auxílio indispensáveis para conclusão do curso de doutorado.

Aos amigos Diego Humberto de Oliveira e Willian Ribeiro Camilo pela valiosa contribuição nos trabalhos de custo de produção aqui desempenhados.

A todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso desta empreitada, minha sincera gratidão!

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

Objetivou-se, com este estudo, avaliar a influência do uso de diferentes fertilizantes nitrogenados quanto às perdas de nitrogênio (N) por volatilização de amônia, emissão de dióxido de carbono (CO₂), teores foliares de N, S, Cu e B; pH do solo, produtividade e custo de produção do café. O experimento foi realizado em campo, em área experimental da Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, utilizando-se delineamento em blocos ao acaso com três repetições, durante dois anos (ago. 2013 a jul. 2015). Os tratamentos utilizados foram dez fertilizantes nitrogenados: ureia, sulfato de amônio, ureia dissolvida em água, nitrato de amônio, ureia + cobre (Cu) + boro (B), ureia + polímero aniônico, ureia + enxofre (S) + polímero, ureia + resina, ureia + NBPT e ureia formaldeído, em total equivalente a 450 kg ha⁻¹ de N, parcelados em três aplicações a intervalos de sessenta dias. No primeiro ano, as perdas médias de N por volatilização seguiram a seguinte ordem decrescente: ureia + polímero aniônico (35,8%) > ureia convencional (31,2%) = ureia + S + polímeros (30,9%) > ureia + Cu + B (25,6%) > ureia + NBPT (11,9%) = ureia + resina plástica (8,6%) > ureia dissolvida em água (4,6%) = ureia formaldeído (1,1%) = sulfato de amônio (0,9%) = nitrato de amônio (0,3%). Tanto para os valores de pH quanto para N foliar foram observadas reduções com o decorrer das avaliações, porém, na média final, não houve diferença significativa entre os tratamentos, assim como para os teores foliares de S, Cu e B. Quanto à emissão de CO₂, observou-se variação entre as três adubações, motivadas, principalmente, por fatores edafoclimáticos na área. Na média, verificou-se maior emissão pela ureia, ureia + polímeros aniônicos, ureia + Cu + B, ureia + S + polímeros e ureia + resina. No segundo ano, na média das três adubações, a ordem decrescente das quantidades de N volatilizado foi: ureia + polímero aniônico (41%) = ureia (38%) > ureia + S + polímero (29%) = ureia + NBPT (26%) > ureia Cu + B (17%) = ureia + resina (16%) > ureia dissolvida em água (5%) = sulfato de amônio (1%) = ureia formaldeído (1%) = nitrato de amônio (0,2%). Os menores valores de pH foram obtidos com a utilização do nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído nesse ano e os teores foliares de N não foram influenciados pelas maiores perdas de alguns fertilizantes e não houve diferenças entre as fontes quanto aos teores foliares de Cu. Os teores foliares de S foram mais altos com uso do sulfato de amônio. Não houve diferenças significativas entre as produtividades médias do biênio 2015/2016. A utilização do fertilizante ureia + Cu + B proporcionou o menor custo operacional total por hectare, o fertilizante ureia + resina o maior custo e o fertilizante ureia + NBPT a maior margem líquida.

Palavras-chave: Volatilização de amônia. Custo de produção do café. Emissão de CO₂ por fertilizantes nitrogenados. NBPT.

ABSTRACT

With this study, we aimed at evaluating the influence of the use of different nitrogen fertilizers regarding nitrogen (N) loss by ammonia volatilization; emission of carbon dioxide (CO₂); foliar content of N, S, Cu and B; soil pH; productivity and coffee production cost. The experiment was conducted in an experimental field at the Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil, using a randomized blocks design with three replicates, during two years (from August 2013 to July 2015). The treatments consisted of ten nitrogen fertilizers: urea, ammonium sulfate, urea dissolved in water, ammonium nitrate, urea + copper (Cu) + boron (B), urea + anionic polymer, urea + sulfur (S) + polymer, urea + thermoplastic resin, urea + NBPT, and urea formaldehyde, in a total equivalent to 450 kg ha⁻¹ of N, divided into three applications at intervals of sixty days. During the first year, the average nitrogen loss by volatilization followed the decreasing order: urea + anionic polymer (35.8%) > urea (31.2%) = urea + S + polymer (30.9%) > urea + Cu + B (25.6%) > urea + NBPT (11.9%) = urea + resin (8.6%) > urea dissolved in water (4.6%) = urea formaldehyde (1.1%) = ammonium sulfate (0.9%) = ammonium nitrate (0.3%). For pH values and foliar N, we verified decrease with the progression of the evaluations. However, there was no significant difference of the final mean between treatments, as well as for the foliar contents of S, Cu and B. Regarding CO₂ emission, there was variation between all three fertilizations, motivated especially by edaphoclimatic factors in the area. In average, we verified higher emission of urea, urea + anionic polymer, urea + Cu + B, urea + S + polymer and urea + resin. During the second year, in the mean of the three fertilizations, the decreasing order of the amount of volatilized N was: urea + anionic polymer (41%) = urea (38%) > urea + S + polymer (29%) urea + NBPT (26%) > urea + Cu + B (17%) = urea + resin (16%) > urea dissolved in water (5%) = ammonium sulfate (1%) = urea formaldehyde (1%) = ammonium nitrate (0.2%). The lowest pH values were obtained with the use of ammonium nitrate, ammonium sulfate and urea formaldehyde, regarding this year, and the foliar contents of N were not influenced by higher losses in some of the fertilizers. In addition, there was no difference between the sources regarding the foliar contents of Cu. The foliar contents of S were higher with the use of ammonium sulfate. There was no significant difference between productivity means of 2015/2016. The use of urea + Cu + B provided lower total operational cost per hectare, fertilizer Urea + resin, the highest cost, and urea + NBPT, the higher net margin.

Keywords: Ammonium volatilization. Coffee production cost. CO₂ emission by nitrogen fertilizer. NBPT.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Esquema do coletor de amônia..... 43
- Figura 2 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na primeira adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 52
- Figura 3 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na segunda adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 57
- Figura 4 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na terceira adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 61
- Figura 5 - Temperatura média do ar, volumes de precipitações e umidade relativa do ar no período concentrado entre a primeira adubação e o fim das avaliações de fluxo de CO₂ da terceira adubação..... 72
- Figura 6 - Representação gráfica dos fluxos de CO₂ oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na primeira adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média (n=3) 73
- Figura 7 - Representação gráfica dos fluxos de CO₂ oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na segunda adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média (n=3) 76

- Figura 8 - Representação gráfica dos fluxos de CO₂ oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na terceira adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média (n=3) 78
- Figura 9 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na primeira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 83
- Figura 10 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na segunda adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 86
- Figura 11 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na terceira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 90
- Figura 12 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) da ureia + resina plástica e das condições climáticas na área (B) na terceira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3) 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Caracterização química e física do solo da área experimental (0-20 cm) antes do início dos tratamentos (2013) e antes do início do segundo ano de avaliações (2014).....	38
Tabela 2 -	Datas das adubações nos dois anos de condução do experimento.	42
Tabela 3 -	Perdas acumuladas de N por volatilização de amônia (% do aplicado).....	64
Tabela 4 -	Valores de pH do solo (0-5cm) nos tratamentos ao longo das adubações nitrogenadas no primeiro ano de condução do experimento.	65
Tabela 5 -	Teores foliares de nitrogênio (g kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.	66
Tabela 6 -	Teores foliares de enxofre (g kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.....	69
Tabela 7 -	Teores foliares de boro (mg kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.....	70
Tabela 8 -	Teores foliares de cobre (mg kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.....	70
Tabela 9 -	Valores acumulados dos fluxos de CO_2 (kg ha^{-1}) obtidos com os diferentes fertilizantes nas três adubações.	79
Tabela 10 -	Perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização nas três adubações do segundo ano de avaliação do experimento (% do aplicado).....	94
Tabela 11 -	Variações no pH do solo (0-5cm) durante a condução do experimento.	96

Tabela 12 -	Variações nos teores foliares de nitrogênio (g kg^{-1}) durante a condução do experimento.....	97
Tabela 13 -	Variações nos teores foliares de enxofre (g kg^{-1}) durante a condução do experimento.....	99
Tabela 14 -	Variações nos teores foliares de cobre (mg kg^{-1}) durante a condução do experimento.....	100
Tabela 15 -	Valores médios de volatilização (% do aplicado - 6 adubações) dos fertilizantes avaliados.	101
Tabela 16 -	Produtividade (sacas 60 kg ha^{-1}) obtida nos tratamentos	102
Tabela 17 -	Relação entre a produtividade dos tratamentos (kg) e a quantidade de N (kg) efetivamente utilizada.	105
Tabela 18 -	Custos com operações (manuais e mecanizadas) para implantação da lavoura.	106
Tabela 19 -	Custos com insumos para a implantação da lavoura.....	107
Tabela 20 -	Custos com operações (manuais e mecanizadas) para condução de 6 a 18 meses da lavoura	108
Tabela 21 -	Custos com insumos para condução da lavoura de 6 a 18 meses.....	108
Tabela 22 -	Resumo dos custos para implantação, condução de 6 a 18 meses e depreciação da lavoura.....	109
Tabela 23 -	Custos com operações (manuais e mecanizadas) para produção de 1 ha de café.	110
Tabela 24 -	Custos para colheita e processos pós-colheita do café ⁽¹⁾	110
Tabela 25 -	Custos com insumos para produção de 1 ha de café.....	111
Tabela 26 -	Custos com fertilizantes nitrogenados para produção de 1 ha de café.	111

Tabela 27 -	Custo operacional efetivo para fase de produção do café.	112
Tabela 28 -	Custo operacional total (COT) de produção para cada fertilizante nitrogenado utilizado	113
Tabela 29 -	Razão entre o Custo Operacional Total e a produtividade de café (kg).	115
Tabela 30 -	Comparativo de diferenças em produtividade e rendimentos financeiros obtidos dos fertilizantes em relação à utilização da ureia.	116

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Adubação nitrogenada do cafeeiro	21
2.2	Perdas de nitrogênio: volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e emissão de óxido nitroso	22
2.3	Emissão de dióxido de carbono	29
2.4	Fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada	31
2.5	Custo de produção e uso de fertilizantes	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Caracterização da área e delineamento experimental	37
3.2	Condução do experimento	39
3.3	Tratamentos	40
3.4	Avaliações	42
3.4.1	Volatilização de amônia	42
3.4.2	Emissão de dióxido de carbono (CO₂)	44
3.4.3	Valores de pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes	45
3.4.4	Produtividade	46
3.4.5	Custo de produção	47
3.5	Análises estatísticas dos dados	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	Primeiro ano (2013/2014)	51
4.1.1	Volatilização de amônia, pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes	51
4.1.2	Emissões de CO₂	71
4.2	Segundo ano (2014/2015)	82
4.2.1	Volatilização de amônia, pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes	82
4.3	Produtividade	101
4.4	Custo de produção	105
5	CONSIDERAÇÕES GERAIS	119
6	CONCLUSÕES	121
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A – Resumo da análise de variância da volatilização de amônia durante o primeiro ano de avaliações ...	135
	APÊNDICE B – Resumo da análise de variância da volatilização de amônia durante o segundo ano de avaliações	136
	APÊNDICE C – Resumo da análise de variância dos valores de fluxo de CO₂	137

APÊNDICE D – Resumo da análise de variância dos teores foliares de nitrogênio no primeiro e segundo anos de avaliações	138
APÊNDICE E – Resumo da análise de variância dos teores foliares de enxofre no primeiro e segundo anos de avaliações.....	139
APÊNDICE F – Resumo da análise de variância dos teores foliares de cobre no primeiro e segundo anos de avaliações	140
APÊNDICE G – Resumo da análise de variância dos teores foliares de boro no primeiro ano de avaliações	141
APÊNDICE H – Resumo da análise de variância dos valores de ph para o primeiro e segundo anos de avaliações	142
APÊNDICE I - Análise de variância da produtividade no ano de 2014	143
APÊNDICE J - Análise de variância conjunta das produtividades dos anos de 2015 e 2016.....	144

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira ocupa lugar de destaque no cenário agrícola nacional e internacional. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), estima-se que o Brasil tenha colhido, na safra de 2015, um total de 43,235 milhões de sacas beneficiadas de café (arábica e conilon), estimando-se, para 2016, uma perspectiva entre 49,126 a 51,493 milhões de sacas em uma área produtiva de 1.977,5 mil hectares. Considerando-se esses números e a bienalidade de produção da cultura, observa-se a média de produtividade, no país, de 23,6 sacas por hectare para os anos 2015 e 2016.

Esses valores refletem os grandes avanços obtidos pela cultura, principalmente, nos últimos 15 anos, obtendo-se aumentos de quase 10 sacas por hectare, na produtividade média nacional, desde o ano de 2001.

Vários fatores podem ser citados como preponderantes, para obtenção desses aumentos, sendo de maior importância o desenvolvimento de novas tecnologias e suas aplicações, gerando ganhos em produtividade e maior rentabilidade ao produtor, variáveis diretamente relacionadas.

Ligado ao aumento em produtividade obtido pelo cafeeiro, ocorre a maior exigência da planta em relação à nutrição e cuidados especiais com a adubação. Um dos nutrientes mais exigidos pelo cafeeiro é o nitrogênio, sendo de fundamental importância para o pleno desenvolvimento e produtividade da cultura. Segundo Matiello et al. (2010), a planta de café demanda cerca de 6,2 kg de N, para a produção de uma saca do produto beneficiado, variando de acordo com clima e condições de cultivo.

Como fonte principal desse nutriente para o cafeeiro, predomina, no Brasil, o uso da ureia. Diversas características desse fertilizante o tornaram preferido pelo agricultores, entre elas a alta concentração de nitrogênio (45%), o que faz reduzir seus custos com transporte, além de sua fácil aquisição, manuseio e aplicação. Entretanto sua aplicação ao solo gera perdas

consideráveis de nitrogênio, para a atmosfera, pela geração do gás amônia (NH_3), que é volátil, durante o seu processo de hidrólise no solo.

Reduzir a perda de nitrogênio por volatilização pela hidrólise da ureia tem sido um desafio enfrentado pelas pesquisas e a indústria de fertilizantes. Entre os fatores que mais influenciam as perdas de N-NH_3 citam-se: o pH do solo, características químicas e físicas do solo, sistema de cultivo (espaçamento), clima, regime de chuvas, manejo dos fertilizantes e, principalmente, a atividade da urease, enzima presente no solo responsável pela hidrólise da molécula da ureia (DENMEAD; FRENEY; DUNIN, 2008; SOMMER; SCHJOERRING; DENMEAD, 2004). Além disso, a dose do fertilizante, horário e método de aplicação e capacidade de troca catiônica de solo, também, são considerados fatores influentes nesse processo (MATTOS JÚNIOR et al., 2003).

Com o conhecimento dos fatores que mais influenciam as perdas por volatilização, várias alternativas têm sido criadas com objetivo de minimizá-las. Entre essas alternativas estão os fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada (TIMILSENA et al., 2014).

Diversas tecnologias são empregadas, para a produção desses fertilizantes, objetivando retardar ou reduzir o efeito imediato da urease, na hidrólise da ureia, proteger o grânulo do fertilizante contra fatores ambientais que promovem sua imediata dissolução no solo ou promover a lenta liberação de N por meio da modificação da sua molécula. Assim espera-se garantir maior sincronização da liberação do nitrogênio com as exigências da cultura, havendo seu maior aproveitamento e conseqüente redução das perdas.

Além dos prejuízos quanto ao menor aproveitamento do N pelas plantas, ocasionado pelas perdas, danos como a emissão de dióxido de carbono e óxido nitroso para a atmosfera, gases causadores do efeito estufa, e lixiviação de nitrato para o subsolo, também, estão ligados à utilização de fontes muito solúveis como é o caso da ureia. Acredita-se que, com a utilização de

fertilizantes de maior eficiência, a liberação do N seja mais racional e maior captura pelas plantas seja realizada, evitando que ele seja emitido para o ambiente provocando tais danos.

Além disso, fertilizantes mais eficientes na utilização do N pelas plantas podem promover impacto direto no custo de produção, auxiliando nos aumentos em produtividade, já que maiores quantidades de N são aproveitadas e, também, reduzindo o custo por unidade de N efetivamente utilizada.

Com isso, buscou-se, com este estudo, quantificar as perdas de N por volatilização de amônia e emissão de dióxido de carbono pelos principais fertilizantes nitrogenados utilizados na cafeicultura e seus reflexos na nutrição, pH do solo, produtividade e no custo de produção do café.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Adubação nitrogenada do cafeeiro

O cafeeiro, cultura perene, apresenta demanda por nutrientes em quantidades elevadas em relação às culturas anuais. Dentre os nutrientes mais exigidos pela planta, ressalta-se o nitrogênio, representando o mais requerido dentre todos os demais. Segundo Matielo et al. (2010), a planta de café acumula, desde o plantio até os trinta meses de idade, cerca de 63g de nitrogênio. Na fase adulta, de acordo com os mesmos autores, a planta absorve cerca de 123g de N, investindo em crescimento e produção, estimando-se um consumo médio de 6,2 kg do nutriente para cada saca de café produzida. Ressalta-se, porém, que esses valores são relativos, podendo sofrer alterações em função de fatores edafoclimáticos de cultivo.

O N tem atuação de grande importância, no metabolismo vegetal, sendo componente da molécula de clorofila, enzimas, proteínas estruturais, ácidos nucleicos dentre outros componentes orgânicos. Possui grande mobilidade no floema, apresentando sintomas de deficiência em folhas velhas e, nesse caso, pode causar drástica redução no desenvolvimento da planta (MALAVOLTA, 2006).

Suas fontes para as plantas são, basicamente, a matéria orgânica do solo (MO) e fertilizantes nitrogenados. A MO é fonte variável de N, sendo dependente dos processos de mineralização que, por sua vez, é afetado por condições de clima e solo das lavouras, sendo incapaz de fornecer a quantidade total do N requerido pela planta (MALAVOLTA, 1986). Além disso, práticas de cultivo inadequadas adotadas, por vezes, nas lavouras de café, como erradicação total do mato, uso de grades e máquinas rotativas, para revolvimento superficial do solo entre as linhas de plantio e baixa aplicação de fontes externas de matéria

orgânica, acabam reduzindo seus teores nos solos e, conseqüentemente, o suprimento de N por essa fonte.

Para seu suprimento via fertilizantes em lavouras em fase produtiva, as doses baseiam-se em dois índices: a produtividade esperada e os teores foliares do nutriente. As recomendações, nesse caso, variam entre regiões produtoras, podendo chegar a 450 kg ha⁻¹ por ano agrícola (GUIMARÃES et al., 1999; RENA; MAESTRI, 1987; VAN RAIJ et al., 1996). Para cafeeiros em fase de formação, Guimarães et al. (1999) recomendam uma dose de 10 a 20 g de N por planta, para o primeiro e segundo anos, aplicadas em cada parcelamento, durante o período chuvoso do ano.

Em razão de sua grande importância para o cafeeiro, a aplicação da dose ideal de N é fundamental, em todas as fases da cultura, podendo interferir no crescimento e, conseqüentemente, na produtividade da lavoura. Segundo pesquisas, a faixa crítica dos teores foliares, para o cafeeiro em produção, encontra-se entre 23 e 35 g kg⁻¹ (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MILLS; JONES JUNIOR, 1996). Esse parâmetro se torna de extrema importância para calibração, recomendações de adubação e avaliação o estado nutricional da planta, uma vez que não se dispõe de análises dos teores de nitrogênio no solo de forma simples como dos demais nutrientes.

2.2 Perdas de nitrogênio: volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e emissão de óxido nitroso

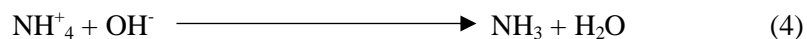
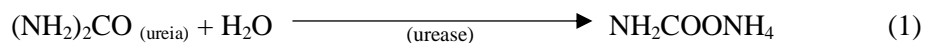
O fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura mundial, atualmente, é a ureia, com uma demanda atual de 149,1 Mt que poderá se elevar para 202,5 Mt em 2017 (HEFFER; PRUD'HOMME, 2014). No Brasil, estima-se que, em 2015, tenham sido consumidos 3,6 Mt do fertilizante (INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE, 2016), sendo o cafeeiro uma das culturas com maior participação nesse consumo.

Diversos fatores contribuem para sua ampla utilização pelos agricultores, porém, em condições de clima tropical, sua eficiência é reduzida pelas perdas ocorridas após sua aplicação ao solo.

O Nitrogênio possui grande dinâmica, no ambiente, ocorrendo constantes modificações em sua forma e estrutura o que pode levar a perdas, seja para a atmosfera ou para camadas profundas de solo (lixiviação). As maiores perdas ocorrem, na sua forma gasosa, sendo elas na forma de N_2 , NO , N_2O e, predominantemente, o NH_3 (amônia), ocorrendo pelo processo de volatilização.

Diversos fatores podem ser citados como influentes, no processo da volatilização de amônia, sendo os principais: o pH do solo, capacidade de troca catiônica (CTC), umidade do solo no momento da adubação assim como volume de chuvas após adubação, cobertura do solo e atividade da urease, que é responsável pela hidrólise da molécula de ureia (NÔMMIK, 1973; SANGOI et al., 2003; TASCIA et al., 2011; TISDALE; NELSON; BEATON, 1985).

O pH do solo é um dos fatores que mais influenciam nos processos de volatilização (TASCIA et al., 2011). A característica ácida dos solos brasileiros, de forma geral, age no desfavorecimento do processo de volatilização, porém, ao ser aplicada ao solo, a ureia sofre hidrólise por meio da enzima urease. Esta reação gera consumo de prótons H^+ e, conseqüentemente, aumenta sobremaneira o pH ao redor dos grânulos do fertilizante, potencializando a geração do NH_3 conforme a seguinte reação (CANCELLIER, 2013):



Com a formação de hidroxilas (OH^-), durante a reação de hidrólise, elas se associam com moléculas de amônio (NH_4^+), formando NH_3 (reação 4), que é volátil e, dessa forma, facilmente, perdido para a atmosfera. Em um pH de 9,3, metade das moléculas se transformam em NH_3 e, em reações posteriores, os processos se equilibram até que ocorra redução de pH e da formação de amônia (reação 6). Ressalta-se, ainda, que, com aumentos nas temperaturas, o processo é acelerado, requerendo valores menores de pH, para formação de NH_3 , durante as reações (CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT, 2010).

No Brasil, onde a maioria das áreas de cultivo constata altas temperaturas, nos períodos de cultivo, observam-se grandes perdas de N-NH_3 por volatilização. Trabalhando nessas condições, Sangoi et al. (2003) verificaram perdas de 63% do N aplicado em um solo de textura arenosa. Segundo Lara-Cabezas e Souza (2008), a aplicação da ureia em superfície ocasionou perdas de até 77% do N total aplicado. Em condições de laboratório, promovendo condições ideais para ocorrência de maiores perdas de amônia por volatilização, Tasca et al. (2011) verificaram perdas de até 50% do N total aplicado. Portanto perdas consideráveis de mais da metade do N aplicado podem ocorrer quando as condições são favoráveis.

Quando as temperaturas são mais amenas, perdas reduzidas de N-NH_3 são observadas. Na região sul do Brasil, onde predomina o clima subtropical com temperaturas mais baixas, são constatadas perdas abaixo de 20% de N-NH_3 por volatilização (BASSO et al., 2004; PORT; AITA; GIACOMINI, 2003). Ros, Aita e Giacomini (2005) observaram perdas de 17% do N aplicado na região central do Rio Grande do Sul. Fontoura e Bayer (2010), avaliando perdas de amônia por volatilização na região Centro-Sul do estado do Paraná, observaram perdas de 12,5% do N aplicado sob a forma de ureia em cobertura. Em experimentos de Viero et al. (2014), com a cultura do milho e trigo, também,

nessa região, observaram perdas inferiores a 5,5% do N, aplicado na época de inverno entre todos nitrogenados utilizados, inclusive, a ureia e perdas menores que 15%, na época de verão, com uso da ureia em superfície.

Para tentar reduzir perdas dessa natureza, algumas metodologias de manejo da adubação têm sido desenvolvidas com resultados positivos. Uma delas é o processo de incorporação da ureia ao solo. Em avaliações de Sangoi et al. (2003), foi observada redução de 14% para 1% do aplicado com uso da ureia em superfície e incorporada, respectivamente. Lara-Cabezas et al. (2004) observaram volatilização de menos de 2% do N aplicado quando se incorporou a ureia ao solo. Também Fontoura e Bayer (2010) detectaram redução das perdas de N-NH₃ de 12,5 para 1,1% do aplicado quando se utilizou ureia em superfície e incorporada ao solo, respectivamente.

A incorporação da ureia ao solo proporciona maior contato do fertilizante com as suas cargas (CTC), possibilitando maior retenção do amônio nessas cargas e reduzindo as perdas. Além disso, o maior volume de solo, em contato com os grânulos do fertilizante, pode inibir o aumento do pH ao seu redor, evitando a formação de amônia. Havendo, ainda, a formação de amônia em subsuperfície, ao se difundir no solo, o NH₃ pode sofrer influência do pH reduzido nesse ambiente, aumentando as chances de nova estabilização como amônio (CANCELLIER, 2013).

Além do processo de incorporação mecânica, a aplicação da ureia juntamente com água, promovendo sua dissolução e rápida incorporação ao solo, também, podem trazer redução das perdas. Alguns estudos, realizados com adubação do cafeeiro via líquida ou fertirrigação, possibilitaram verificar uma redução de até 50% da dose de N no período pós-plantio (FAGUNDES, 2006) ou em plena produção (TEODORO et al., 2004) sem prejuízos ao crescimento ou produtividade da lavoura. Nessa mesma linha, estudos de Sobreira et al. (2011) afirmam reduções de até 30%, na dose de N, para cafeeiro adubado, via

fertirrigação sem prejuízo ao seu crescimento. Porém alguns autores contradizem esses resultados, afirmando ser necessária não uma redução, mas um aumento em 30% na dose de N quando se trata de lavouras fertirrigadas (SANTINATO; FERNANDES, 2002). As explicações mais plausíveis, para essas diferenças, podem estar relacionadas ao tipo de solo da lavoura e à idade fenológica da planta, diretamente, relacionados com suprimento e demanda, respectivamente.

As constatações sobre possíveis reduções, nas doses de N, quando aplicado via fertirrigação, estão ligadas ao aumento da eficiência da adubação nitrogenada, nessas circunstâncias, ocorrendo sua rápida incorporação ao solo, ficando o fertilizante menos vulnerável às perdas por volatilização e consequente maior aproveitamento.

As reações que envolvem os processos de volatilização são mais intensas quando a ureia é aplicada, na superfície do solo sem incorporação, ocorrendo daí maiores perdas (ROCHETTE et al., 2013). Buscando maior esclarecimento sobre esse processo, Holcomb et al. (2011) avaliaram perdas de nitrogênio por volatilização, na cultura do milho irrigado em Umatilla – Oregon, verificando que a ureia aplicada via fertirrigação obteve redução de 90% nas perdas, quando comparada à ureia em superfície sem dissolução em água, trazendo confirmação a hipótese de menores perdas nessas situações.

Embora sua comprovada eficiência nas reduções das perdas de N-NH₃, a aplicação de N via água (fertirrigação ou adubação líquida) remete ao questionamento, por parte dos produtores e, também, pela pesquisa, sobre sua possível relação com perdas por lixiviação.

O nitrato (NO₃⁻) é um dos ânions presentes no solo com maior facilidade de perdas por lixiviação, pela sua baixa afinidade pela fração coloidal do solo. Não se prendendo aos colóides do solo, o nitrato se move para profundidades distantes das zonas de absorção pelas raízes, ficando indisponíveis às plantas.

Essa perda é mais intensa em solos arenosos (CORREA; WHITE; WEATHERLEY, 2006), por sua maior velocidade de drenagem, podendo atingir o lençol freático e causar contaminação da água. A quantidade de N lixiviado é dependente, especialmente, da quantidade do N aplicado, do tipo de solo e do volume de precipitação (NIELSEN et al., 1982). Lorensini et al. (2012) e Tasca et al. (2011) atribuíram as maiores quantidades de lixiviação em seus trabalhos à maior quantidade de N aplicado.

Quando ingerido em grandes quantidades, no interior do corpo humano, o nitrato pode ser reduzido a nitrito que, por sua vez, oxida a hemoglobina promovendo sua conversão a meta-hemoglobina. Como a hemoglobina tem função de transporte de O₂, seu comprometimento pode levar à asfixia (FAQUIN; ANDRADE, 2004).

Segundo estudos de Bortolotto et al. (2013), em áreas de cerrado com solo arenoso (20% de argila), observou-se lixiviação de nitrato, para camadas de até um metro de profundidade, em quantidades superiores ao limite previsto pela legislação brasileira de 10 mg L⁻¹ na água, para o consumo humano (BRASIL, 2004; BRASIL, 2008). Estas quantidades lixiviadas foram obtidas, quando se aplicaram quantidades superiores a 400 kg ha⁻¹ de N, afirmando os autores ser essa uma dose limite de N para que não ocorram grandes perdas por lixiviação. Resultados semelhantes, também, foram encontrados por Cruz, Parron e Rocha (2008) que observaram lixiviação de até 154 mg L⁻¹ de nitrato, para profundidades de até um metro de solo, na região de Planaltina, Distrito Federal, com uma elevada dose de N (800 kg ha⁻¹). Portanto verifica-se que, em solos arenosos, esse processo é, de fato, mais pronunciado.

Nos solos argilosos, predominantes no cultivo do cafeeiro na região Sul de Minas Gerais, ocorrem maiores quantidades de cargas nos coloides, tanto negativas quanto positivas, pelo estado de intemperização desses solos (geralmente latossolos), sendo local de ligação dos ânions nitrato, reduzindo

suas perdas para camadas mais profundas. Além disso, os solos argilosos possuem drenagem mais lenta do que os arenosos, contribuindo com a redução da lixiviação. No entanto Souza (2012), avaliando perdas de nitrato por lixiviação em um latossolo da zona da mata mineira, observou, no cultivo do cafeeiro em solo com 53% de argila em média, a lixiviação acumulada no perfil de 1,2m de solo foi de 55,45; 69,98 e 74,84 kg ha⁻¹ de N, na utilização de 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Esses valores podem ser considerados altos levando-se em consideração a perda de quase de 30% do aplicado somente por lixiviação na dose de 200 kg ha⁻¹.

Além das perdas do nitrogênio, por meio da volatilização de amônia e lixiviação de nitrato para o solo, a emissão de óxido nitroso, também, representa fonte de perdas e um risco ao meio ambiente.

O óxido nitroso é um gás produzido a partir das reações de desnitrificação do ciclo do nitrogênio (SMITH et al., 2008). Entre os três principais gases causadores do efeito estufa, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), o N₂O é o que existe em menor quantidade na atmosfera, porém sua contribuição, para o aquecimento global, é cerca de 310 vezes superior ao CO₂ (BROTTO et al., 2010). Estima-se que, no Brasil, cerca de 90% de sua emissão, para a atmosfera, sejam provenientes de atividades agropecuárias (BRASIL, 2010), em especial à prática da adubação nitrogenada. Esse dado se torna alarmante visto a necessidade do uso de grandes quantidades de nitrogênio para a produção agrícola.

São escassos os estudos, avaliando emissão de óxido nitroso pela atividade cafeeira, no entanto resultados demonstram estreita relação entre a emissão e o tipo de fertilizante nitrogenado utilizado, além da quantidade de N aplicada. Segundo Venterea, Burger e Spokas (2005), o uso de amônia anidra como fonte de nitrogênio promoveu emissão de N₂O cerca de 2 a 4 vezes maior do que com utilização do nitrato de amônio ou ureia.

Com o avanço recente do uso de fertilizantes nitrogenados de maior eficiência, espera-se, também, redução das quantidades de N_2O emitidas com sua utilização. O uso de ureia recoberta com polímero, por exemplo, promoveu redução em 35% da emissão de N_2O quando comparado à ureia comum (AKIYAMA; YAN; YAGI, 2010). Esses fertilizantes promovem maior sincronia entre liberação de N e sua absorção pela planta, fazendo com que a planta o aproveite ao máximo.

Com a utilização de fertilizantes convencionais, como a ureia, o IPCC sugere uma taxa média de 1% de conversão do total de fertilizante, aplicado em óxido nitroso, independente da dose utilizada (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2006). Portanto existe uma relação linear entre dose e quantidade de N_2O , emitida pela adubação nitrogenada, com alternativas a serem avaliadas para sua mitigação.

2.3 Emissão de dióxido de carbono

Recentemente, a Agência Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) dos Estados Unidos, anunciou dados alarmantes sobre a concentração de dióxido de carbono (CO_2), na atmosfera, atingindo valores de 400 partes por milhão (ppm) na média mundial. Segundo a agência, é o valor mais alto dos últimos 800.000 anos e isso pode agravar, de forma drástica, o efeito estufa no planeta.

Dentre os gases causadores do efeito estufa, o CO_2 é o mais abundante, na atmosfera terrestre, sendo oriundo, principalmente, de atividades humanas que envolvem queima de combustíveis fósseis como petróleo e carvão (TOWNSEND; BEGON; HARPER, 2006).

Segundo Machado (2005), existem na terra quatro principais compartimentos naturais de carbono: oceanos, atmosfera, formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral e os ecossistemas terrestres (biota e solo). O compartimento do solo representa o maior entre os compartimentos terrestres,

sendo ele 4 vezes maior que o da vegetação e 3,3 vezes o da atmosfera. Em uma escala global, estima-se que a respiração do solo emita para a atmosfera cerca de 75 bilhões de toneladas de CO₂ por ano (IPCC, 2001).

No Brasil, estima-se que 91% das emissões de N₂O, 87% das emissões de CH₄ e 78% das emissões de CO₂ sejam oriundas da atividade agropecuária ou por mudanças no uso da terra (BRASIL, 2010). Entre as principais práticas agrícolas causadoras dessa emissão citam-se as queimadas em lavouras e pastagens, desmatamentos, queima de combustíveis fósseis, manejo do solo e uso de fertilizantes.

O fluxo total de CO₂ da superfície do solo é oriundo, basicamente, da respiração das raízes das plantas e da decomposição da matéria orgânica por microorganismos (SELIG; SEILER; TYREE, 2008). Portanto técnicas de manejo do solo podem influenciar a emissão de CO₂. Práticas de cultivo convencional, por exemplo, podem aumentar as emissões do gás para a atmosfera, pois o revolvimento do solo gera desagregação das suas partículas, expondo a matéria orgânica à ação de microorganismos, que tem atividade acelerada pela maior aeração e temperatura, decompondo a matéria orgânica, emitindo, assim, CO₂ para o ambiente (JACINTHE; LAL, 2005; SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 1999).

As adubações nitrogenadas são, também, responsáveis pela geração de CO₂, direta e indiretamente. De forma direta, a hidrólise da ureia emite CO₂ para a atmosfera pela reação do carbonato de amônio com íons H⁺ do solo, com geração de amônio, dióxido de carbono e água. De forma indireta, o processo de fabricação de fertilizantes nitrogenados possui alto custo energético, emitindo altas quantidades de CO₂ durante sua produção. Considerando 100% de eficiência no processo Haber-Bosch, para produção industrial de amônia, ocorre

uma emissão de 0,375 mols de carbono para cada mol de nitrogênio produzido (SCHLESINGER, 1999).

Com o aumento das temperaturas na terra, influenciado pelos aumentos de CO₂ na atmosfera, as atividades agrícolas, inclusive, a cafeicultura, podem sofrer sérias consequências. Assad et al. (2004) relataram que, considerando o aumento da temperatura em 1° a 5,8°C, o cultivo de café será reduzido, para apenas 9 dos 455 municípios produtores de café, no Estado de São Paulo e, se essa projeção de elevação de temperatura atingir 3°C, o cultivo de café pode ser uma atividade de alto risco, mesmo em áreas irrigadas.

Apesar de sofrer as consequências com o aumento do CO₂ na atmosfera, a cafeicultura possui, em seus processos de produção, algumas etapas responsáveis por emissões de carbono e seus equivalentes, como emprego de energia elétrica, combustíveis fósseis para as operações agrícolas, uso de fertilizantes nitrogenados e de calcário (BELIZÁRIO, 2013). Segundo Oliveira Júnior et al. (2015), a atividade cafeeira produz cerca de 2,13 tCO₂ eq ha⁻¹ de gases de efeito estufa, apontando o emprego da adubação nitrogenada e dos corretivos como principais responsáveis pelas emissões.

Para manter a atividade produtiva, são indispensáveis o emprego desses insumos que, de certa forma, promovem desequilíbrios ambientais; no entanto a adoção de tecnologias que visem à redução desses riscos são indispensáveis na atual situação.

2.4 Fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada

Novas tecnologias têm sido desenvolvidas pela pesquisa em adubação e nutrição de plantas, para minimizar as perdas do nitrogênio, para o ambiente e reduzir danos ao ambiente e os prejuízos aos agricultores. Uma delas são os fertilizantes de maior eficiência, comumente chamados de “ureias protegidas”,

que, em síntese, buscam sincronizar a liberação do nitrogênio com o ritmo de demanda pela planta, promovendo maior aproveitamento do nutriente.

Esses fertilizantes tomam destaque, no cenário agrícola mundial, por promoverem redução de efeitos ambientais diversos como a emissão de óxido nitroso e dióxido de carbono, para a atmosfera e evitar perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009;. TRENKEL, 2010).

Os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada podem ser divididos em três categorias: estabilizados, liberação controlada e liberação lenta.

Entende-se por fertilizante nitrogenado estabilizado aquele que possui algum aditivo que seja capaz de evitar a transformação do nitrogênio, em alguma forma não desejável, assim como o processo de nitrificação (transformação do amônio em nitrato) ou a hidrólise da molécula da ureia. Dentre esses, são mais comuns, no mercado, os inibidores da urease que retardam os processos de hidrólise, em condições adversas de clima, reduzindo a volatilização de amônia.

Os mecanismos capazes de bloquear a ação da urease são, basicamente, três: bloqueio do sítio ativo da enzima pela reação de íons como prata, mercúrio e cobre com grupos sulfidril da enzima; ação de compostos semelhantes à ureia, como as tio-ureias e metil-ureias que inativam o sítio ativo da urease e adição de moléculas que reagem com o níquel presente na urease, inativando-a (KRAJEWSKA; ZABORSKA; CHUDY, 2004). Em razão da estrutura bastante análoga à da ureia, o ácido bórico pode, também, ser considerado um substrato para a urease, ocorrendo inibição do tipo competitiva nesse processo (BENINI et al., 2004).

Um dos inibidores da urease mais utilizados, atualmente, é o NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida). Quando em contato com o solo, o NBPT decompõe rapidamente a NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), tornando-se,

assim, capaz de inativar a urease pela substituição quase perfeita das moléculas da água próximas ao seu sítio ativo, ligando-se aos átomos de níquel (KRAJEWSKA, 2009). Em condições de cultivos de climas tropicais como o cafeeiro, o uso do NBPT tem apresentado alguns inconvenientes quanto ao tempo de duração da sua proteção, sendo esse reduzido drasticamente. Segundo Tasca et al. (2011), esse período foi de dois dias apenas, nessas condições, o que inviabilizaria sua utilização como protetivo.

Existe, ainda, a tecnologia de liberação lenta e controlada de nitrogênio pelos fertilizantes. Segundo Shaviv (2005), o termo fertilizante de liberação controlada deve ser utilizado, quando se tem conhecimento do padrão e da velocidade de liberação do nutriente, para as plantas e existe um controle desse processo durante a fabricação do produto. Já, para os fertilizantes de liberação lenta, não existe o conhecimento desses parâmetros, porém ele apresenta liberação de nutriente mais lenta, quando comparado com um fertilizante de liberação imediata de referência, como a ureia.

Entre os fertilizantes de liberação controlada citam-se as ureias revestidas ou encapsuladas. Os revestimentos dos grânulos de ureia, nesse caso, são feitos com uso de compostos orgânicos ou inorgânicos que controlam a liberação de N para o solo (CAHILL et al., 2010; NASH; MOTAVALLI; NELSON, 2012). Esses compostos protegem o grânulo do fertilizante contra ação da água e do ar, reduzindo sua dissolução imediata, promovendo maior sincronia entre quantidade liberada e quantidade requerida pela cultura, à medida que esses serão decompostos permitindo a entrada de água e dissolução do grânulo. Dentre os principais compostos mais utilizados, para esse fim, estão o enxofre, polímeros, poliestireno, poliésteres, poliuretano, ácidos graxos, látex, produtos à base de petróleo (resinas), magnésio e fosfato de cálcio, gesso, Azadirachta (Neem) e cera (TIMILSINA et al., 2014).

O recobrimento da ureia com enxofre e polímeros representam a maior parte do mercado de fertilizantes de liberação controlada, sendo utilizados de forma conjunta ou isolada nos grânulos. Ressalva-se que o período de liberação depende da espessura do revestimento e da qualidade do processo de revestimento por parte da indústria de fertilizantes (TRENKEL, 2010), podendo, quando mal conduzido, levar à liberação quase imediata do nutriente.

Como maior representante dos fertilizantes de liberação lenta, principalmente, os mais utilizados na cafeicultura, cita-se a ureia formaldeído. Essa fonte é obtida pela reação de condensação de formaldeídos (H_2CO) com moléculas de ureia em condições controladas do processo de fabricação. O processo resulta em uma mistura de moléculas de ureias metiladas em formato de longas cadeias poliméricas de diferentes tamanhos (TRENKEL, 2010). Estas longas cadeias moleculares aumentam o tempo para liberação do N, sendo esse processo dependente da ação de microorganismos do solo, que decompõem a cadeia lentamente em pequenas unidades, prontamente, absorvidas pelas plantas (TRENKEL, 2010).

As pesquisas têm avançado, no desenvolvimento de tecnologias de liberação gradual do nitrogênio, trazendo vantagens ao cultivo do cafeeiro, principalmente, na questão da redução do parcelamento das adubações na cultura. Essa possibilidade traz impactos diretos, nos custos de produção, uma vez que pode possibilitar a redução dessa atividade no campo, reduzindo, assim, os gastos com maquinário, combustível e mão de obra.

2.5 Custo de produção e uso de fertilizantes

A cafeicultura tem se tornado cada vez mais competitiva, exigindo uma conduta empresarial por parte dos produtores para se manterem no mercado. Dentre os aspectos mais importantes, nesse novo cenário, destaca-se a avaliação dos custos de produção da atividade, dando base ao produtor, para tomada de

decisões, de modo a aumentar sua produtividade e a margem de lucro, fatores diretamente relacionados. Nesse aspecto, a escolha de insumos adequados, ou seja, aqueles que lhe proporcione melhor relação custo/benefício deve ser analisado com cautela.

De acordo com Nogueira (2004), o produtor deve se profissionalizar por completo, ou seja, deve adotar todas as técnicas e procedimentos modernos de modo que produza com eficiência, buscando escala e redução de custos. Para isso, deve optar pelo uso de novas tecnologias, de acordo com sua capacidade de adoção. Matiello et al. (2010) afirmam que a atividade cafeeira não pode mais ser tratada simplesmente pela quantidade de plantas ou área plantada na fazenda, mas pelo seu ótimo produtivo, visando à máxima lucratividade.

Nasser et al. (2012), avaliando o custo de produção da cafeicultura, no Sul de Minas Gerais, constataram que os gastos com fertilizantes e corretivos para a cultura chegaram a 26% do custo de implantação e formação da lavoura e a 22% na fase de produção.

O maior problema dos custos relacionados aos fertilizantes está ligado à grande dependência do mercado brasileiro da importação de nutrientes. Estima-se que 73% do nitrogênio, 34% do fósforo e 92% do potássio sejam importados pelo país (AGÊNCIA NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS, 2014). Portanto oscilações, no mercado nacional e internacional assim como variações no preço do dólar, influenciam, de forma direta, no custo de produção agrícola no Brasil, principalmente, na cultura do café, grande consumidora de fertilizantes.

No Brasil, o potencial dos fertilizantes de liberação lenta, controlada e estabilizados, ainda, é pouco explorado, visto que, no mundo, o crescimento da utilização desse tipo de fertilizante ocorreu a taxas de 45% entre os anos de 1995 e 1996 e entre os anos de 2004 e 2005, quando o consumo atingiu 786.000 toneladas métricas, totalizando 0,20% do consumo mundial de fertilizantes. Os

maiores consumidores são Estados Unidos e China, com 59 e 26%, respectivamente, do mercado mundial (INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION, 2010)

Além da dependência externa por nutrientes, as tecnologias utilizadas, para produção de fertilizantes de maior eficiência, são, em sua maioria, desenvolvidas, no exterior, onde a tecnologia é mais amplamente utilizada. Esse fator se torna mais um entrave à sua adoção pelo cafeicultor brasileiro, pois encarece o produto e reflete sobremaneira no custo de produção final do café. Porém estudos devem ser realizados, pois, havendo perdas por volatilização, o custo efetivo por ponto de N (Custo por unidade de fertilizante/unidade de N efetivamente utilizado) pode sofrer mudanças, principalmente, quando as condições de cultivo são diferenciadas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido no campo, em área experimental do Setor de Cafeicultura, Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (UFLA), no município de Lavras – MG, no período de agosto de 2013 a julho de 2015.

A área experimental está situada a uma altitude de 910 metros, em latitude 21° 14' 06" Sul e longitude de 45° 00' 00" Oeste. O clima é classificado como Cwa, mesotérmico com verões brandos e suaves e estiagens de inverno (SÁ JUNIOR et al., 2012).

Segundo as séries históricas de dados climáticos da região, a precipitação anual média, para o município de Lavras, é de 1.460 mm, com a maior e menor precipitação mensal média de 321 mm em janeiro e 7 mm em julho, respectivamente. A temperatura média anual é de 20,4 °C, variando de 17,1 °C em julho a 22,8 °C em fevereiro. A evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR) variam de 899 a 956 mm e de 869 a 873 mm, respectivamente (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013) de textura argilosa, cujas principais características químicas e físicas, na camada de 0 a 20 cm, antes do início dos tratamentos, em cada ano, podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo da área experimental (0-20 cm) antes do início dos tratamentos (2013) e antes do início do segundo ano de avaliações (2014).

Característica	Unidade	2013	2014
pH	-	4,5	5,0
P	mg dm ⁻³	2,6	14,0
K	mg dm ⁻³	97	354,0
Zn	mg dm ⁻³	1,4	4,3
Cu	mg dm ⁻³	1,6	2,0
Mn	mg dm ⁻³	8,6	13,3
B	mg dm ⁻³	0,1	0,3
Fe	mg dm ⁻³	98,8	57,7
Ca	cmol _c dm ⁻³	0,7	2,6
Mg	cmol _c dm ⁻³	0,4	0,7
Al	cmol _c dm ⁻³	1,4	0,2
H + Al	cmol _c dm ⁻³	12,3	5,7
t	cmol _c dm ⁻³	2,7	4,1
T	cmol _c dm ⁻³	13,6	9,5
Saturação por alumínio	%	51,8	7,0
Saturação por bases	%	20,1	41,0
Matéria orgânica	g kg ⁻¹	6,9	2,9
P-remanescente	mg L ⁻¹	10,6	20,6
Areia	%	18	-
Silte	%	24	-
Argila	%	58	-

Fonte: Do autor (2016).

Nota: pH = água (1:2); P, K, Fe, Zn, Mn e Cu = Extrator Mehlich-1; Ca, Mg e Al = Extrator KCl (1 mol L⁻¹); S = Extrator fosfato monocalcico em ácido acético; H + Al = Extrator SMP; Matéria orgânica: oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; B = Extrator água quente.

Foi utilizada a cultivar de *Coffea arabica* L. Catuaí Vermelho IAC 144, de porte baixo, plantada em janeiro de 2010. O plantio foi realizado com espaçamento de 3,7m entre linhas por 0,7m entre plantas. O delineamento adotado para o experimento foi o de blocos ao acaso, com um total de três repetições. Para avaliação dos teores foliares de nitrogênio e pH do solo foi considerado o delineamento em formato de parcelas subdivididas no tempo. As

parcelas dos tratamentos foram compostas por 12 plantas, sendo consideradas úteis para avaliação as 10 plantas centrais. Os tratamentos foram dispostos, nas linhas de plantio dos blocos, saltando-se sempre uma linha de plantio, tendo essa, também, função de bordadura.

3.2 Condução do experimento

Desde o plantio da lavoura até julho de 2013, os cuidados com adubação e correção do solo da área foram feitos, segundo as recomendações de Guimarães et al. (1999).

Para adubação com micronutrientes, tanto no período de formação quanto na condução do experimento, optou-se por produto comercial, contendo 6,0% de zinco, 3,0% de boro, 2,0% de Mn, 10,0% de Cu, 10,0% de S, 1,0% de Mg e 10,0% de K₂O, aplicado via foliar (300 L ha⁻¹ de calda), em número de três ao ano entre novembro e fevereiro, a intervalos de 45 dias.

Sessenta dias, antes do início das adubações com os fertilizantes previstos nos tratamentos, foi realizada calagem, na área, segundo recomendações de Guimarães et al. (1999), com total de 2 t ha⁻¹ nos dois anos do experimento.

Foi realizado, rotineiramente, o monitoramento de pragas e doenças e, na constatação de níveis de controle, foi realizado com produto químico registrado para a cultura. Durante a condução do experimento, foram constatados maiores índices de ferrugem e cercosporiose, que foram controladas com uso de produto comercial, contendo mistura de epoxiconazol (triazol) + piraclostrobina (estrobirulina) na dose de 1,5 L ha⁻¹. Quanto às pragas, foi necessário apenas o controle de formigas.

O controle do mato foi feito com utilização de herbicida à base de glyphosate (2 L ha⁻¹), alternado com capina mecânica com utilização de roçadora e capina manual nas linhas de plantio.

Aproximadamente 30 dias antes da colheita das parcelas, foi realizada “arruação” da lavoura, ou seja, a limpeza das linhas de plantio, com retirada de folhas secas, mato, galhos e remanescente de fertilizantes, para que fosse possível a catação dos grãos de café que caíssem antes da colheita e, assim, quantificados na produtividade.

Dados de clima como volume de chuvas (precipitação), temperaturas médias e umidade relativa do ar foram monitorados, diariamente, por estação climatológica automática instalada nas adjacências da área experimental.

3.3 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos por 10 fertilizantes nitrogenados de diferentes tecnologias utilizadas na cafeicultura, atualmente, com algumas de suas características descritas a seguir:

- a) Ureia convencional (45% N).
- b) Nitrato de amônio (31% N).
- c) Sulfato de amônio (19% N).
- d) Ureia (44% N) + 0,15 % Cu ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) e 0,4% B (H_3BO_3) (HERINGER, 2008). Nesse caso, os grânulos de ureia foram recobertos por partículas de Cu e B com menos de 0,015mm de diâmetro por meio de processo industrial.
- e) Ureia (41% N) + polímeros aniônicos solúveis em água (inibidores da nitrificação, contendo cargas negativas que retêm NH_4^+).
- f) Ureia (39% N) + enxofre elementar (S^0) + polímeros: a ureia foi recoberta com partículas de enxofre elementar que recebeu camada de polímeros orgânicos para auxiliar na selagem contra entrada de água.

- g) Ureia (39% N) + resina plástica recobrando os grânulos de ureia, possibilitando o contato da água com a ureia de acordo com sua degradação pela ação de temperatura e umidade do solo.
- h) Ureia formaldeído (26% de N): obtida pela reação entre moléculas de formaldeído (H_2CO) com grandes quantidades de ureia, em condições controladas de fabricação, resultando em uma mistura de cadeias de ureias metiladas de diferentes tamanhos, liberadas, gradualmente, ao solo pela ação de microorganismos que decompõem a cadeia.
- i) Ureia (44% N) tratada com 530 mg kg^{-1} de NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida), um inibidor da urease do solo.
- j) Ureia convencional (45% N), dissolvida em água.

Para aplicação da ureia dissolvida em água, a quantidade, previamente, calculada, para a área (sendo a mesma para a ureia convencional), foi diluída em água limpa na proporção de 50g de ureia para cada litro de água e aplicada, no mesmo local de adubação estipulado, para as demais fontes, em proporções iguais entre as plantas.

Todos os fertilizantes são produtos comerciais utilizados na cafeicultura.

As adubações foram realizadas com 450 $kg\ ha^{-1}$ de N e 300 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O , divididos em três aplicações, a intervalos de 60 dias, a partir do início do mês de novembro, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Datas das adubações nos dois anos de condução do experimento.

Ano 1 (2013/2014)		
Adubação 1	Adubação 2	Adubação 3
19/11/2013	18/01/2014	18/03/2014
Ano 2 (2014/2015)		
Adubação 1	Adubação 2	Adubação 3
11/11/2014	08/01/2015	06/03/2015

Fonte: Dados do autor (2016)

Também foi realizada adubação fosfatada, na dose de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 , utilizando-se Superfosfato Simples (20% de P_2O_5), em dose única juntamente com a primeira aplicação de nitrogênio e potássio. Como fonte de potássio foi utilizado o cloreto de potássio (60% K_2O).

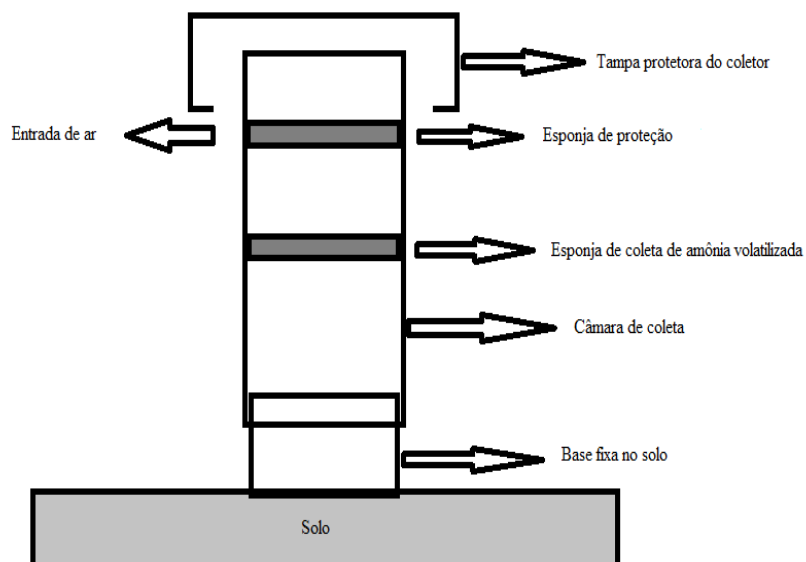
3.4 Avaliações

As avaliações realizadas no experimento para obtenção dos dados contidos no trabalho estão detalhas a seguir.

3.4.1 Volatilização de amônia

Para avaliação das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH_3), foram instalados coletores semiabertos de amônia, adaptados de Nõmmik (1973), inseridos nas linhas de adubação. Os coletores foram produzidos com tubos de cloreto de polivinila (PVC), com 20 cm de diâmetro e 50 cm de altura, inseridos sobre bases fixas no solo produzidas do mesmo material. Os coletores foram protegidos no topo, com espaços entre a proteção e o coletor que permitissem a passagem de ar, conforme Figura 1.

Figura 1 - Esquema do coletor de amônia.



Fonte: Dados do autor (2016)

Foram afixadas três bases por parcela, contendo quantidades conhecidas de fertilizantes em seu interior, equivalentes à área aplicada e pesadas em balança de precisão. Os coletores foram trocados de base, a cada avaliação, no intuito de minimizar influências ambientais como temperatura, precipitação e umidade do ar.

No interior dos coletores, foram inseridas duas esponjas ($0,02 \text{ g cm}^{-3}$ de densidade e 2 cm de espessura), cortadas no mesmo diâmetro das câmaras, embebidas em uma solução de ácido fosfórico (H_3PO_4 ; 60 ml L^{-1}) e glicerina (50 ml L^{-1}), para captura da amônia volatilizada e posicionadas dentro dos coletores à altura de 30 e 40 cm do solo. A esponja superior teve função de proteção contra influência do nitrogênio contido no ambiente e a inferior teve função de captura no N-NH_3 volatilizado.

As coletas de esponjas, para avaliação do nitrogênio volatilizado, foram feitas com mais intensidade, nos dias próximos à aplicação dos tratamentos, sendo realizadas, diariamente, até o quinto dia após a adubação, em horários fixos (08 horas da manhã). Após o quinto dia, as coletas se estenderam, conforme o comportamento das perdas, influenciadas pelas condições climáticas, ocorrendo em dias alternados, de forma distinta entre as adubações, como pode ser observado nas Figuras 2, 3, 4, 9, 10, 11 e 12.

Em laboratório, o N-NH₃ volatilizado contido nas esponjas foi extraído, por meio de funil de Buchner e bomba de vácuo, após cinco lavagens sequenciais com água destilada em uma quantidade de 80 ml em cada lavagem. Após a extração, uma alíquota de 50 ml da solução foi armazenada, em refrigerador a 5°C e, posteriormente, destilada pelo método Kjeldahl para quantificação da amônia volatilizada.

Para correção de possíveis contaminações entre as amostras, foram utilizadas três esponjas como teste em branco, ou seja, apenas com adição de reagentes, sem contato com amônia dos tratamentos para servir de padrão de pureza. Os valores, após processamento das amostras, obtidos nesses padrões foram descontados dos valores obtidos, nas esponjas de captura de amônia, por se tratar então de contaminação.

3.4.2 Emissão de dióxido de carbono (CO₂)

As avaliações da emissão de CO₂ dos fertilizantes foi realizada somente no primeiro ano da condução do experimento (2013/2014).

Para avaliação da emissão de CO₂, foram instaladas três bases fixas por parcela, na faixa de adubação, estas com diâmetro de 10 cm e altura de 2 cm. Em seu interior foram aplicadas quantidades conhecidas de fertilizantes, pesados em balança de precisão e aplicados no dia das adubações do experimento. As mensurações do fluxo de CO₂ do solo começaram a ser avaliadas, dois dias antes

da aplicação dos fertilizantes, para se certificar do aumento do fluxo do gás influenciado pelas adubações, seguindo-se datas próximas às avaliações de volatilização de amônia. Em cada avaliação, foi utilizada uma das câmaras por parcela, fazendo rotação entre elas, nas próximas avaliações, para minimizar possíveis erros como diferenças de solo na parcela.

As mensurações foram realizadas, por meio de aparelho analisador de gás por infravermelho (IRGA), da marca Licor 8100 A[®], contendo uma câmara que realizou as medidas por espectroscopia de absorção óptica. As mensurações foram realizadas, em tempo pré-programado no aparelho, de dois minutos em cada câmara (parcela), sempre entre oito e dez horas da manhã.

Os valores de fluxo de CO₂ foram obtidos em $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e transformados para $\text{kg. ha}^{-1}.\text{dia}^{-1}$.

3.4.3 Valores de pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes

Um dia antes de cada adubação e 60 dias após a última adubação, foram coletadas amostras de solo, com auxílio de trado de caneca, para determinação do pH e folhas, para determinação dos teores foliares de nutrientes.

Para determinação do pH, foram coletadas na camada de 0-5 cm de solo, cinco amostras simples por parcela que, posteriormente, foram misturadas para formação de amostra composta. As amostras foram secas à sombra e peneiradas em peneiras de 20 cm de diâmetro e malha de 2 mm (para obtenção de terra fina seca ao ar). Dessa amostra, retirou-se o volume de 10 cm³ a qual foi misturada em 20 ml de água destilada. Posteriormente a mistura foi agitada em agitador laboratorial por 1 minuto. Após a agitação, a amostra foi deixada em repouso por 30 minutos e, assim, foi feita a leitura do pH da amostra (EMBRAPA, 1997).

Para determinação do teor foliar de nutrientes, retiraram-se das 5 plantas centrais de cada parcela duas folhas de cada lado da planta, do terceiro ou quarto

pares de folhas, a partir da ponta de ramos produtivos da sua região mediana, perfazendo um total de 4 folhas por planta e 20 folhas por parcela. Foram coletadas somente folhas saudáveis, ou seja, sem sinais de ataque de pragas ou doenças. Para a amostragem de folhas, respeitou-se um período de 30 dias, anteriormente a essa, quanto à aplicação de nutrientes via foliar, embora não fosse adotada aplicação foliar de nitrogênio, para evitar interferência nas análises.

Logo após a coleta, as folhas foram levadas para laboratório, onde foram lavadas com água destilada e, imediatamente, colocadas para secagem, em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C, até atingirem peso constante. Após a secagem, as folhas foram moídas em moinho tipo Wiley e procedeu-se às análises químicas do tecido. No primeiro ano de condução do experimento foram avaliados os teores foliares de nitrogênio, enxofre, cobre e boro. No segundo ano foram avaliados os teores de nitrogênio, enxofre e cobre. Optou-se pela avaliação desses nutrientes pelo fato de se tratar de experimento com fontes diferenciadas de nitrogênio e, em algumas dessas fontes, havia, também, os elementos enxofre, cobre e boro, utilizados para proteção dos grânulos de ureia, que poderiam, de alguma forma, influenciar a nutrição das plantas quanto a esses nutrientes.

3.4.4 Produtividade

Para avaliação da produtividade, realizou-se a colheita dos frutos de cada parcela, separadamente, quando estas apresentavam, em média, 10% de frutos em estágio verde e 90% em estágio maduro ou passa. Os frutos foram colhidos somente nas plantas úteis das parcelas (10 plantas), sobre panos apropriados. Após a colheita de toda a parcela, foi realizada a medição, em litros da sua produção total e retirada uma amostra de 5 litros para secagem em

terreiro. Essas amostras foram colocadas sobre peneiras quadradas de 0,5m por 0,5m de dimensão e secadas ao sol até umidade média de 11%.

Após atingir a umidade ideal, as amostras foram pesadas e medidas, em recipientes graduados, seguindo, imediatamente, para o descascamento, quando foram, novamente, pesadas e medidas. Com obtenção dos pesos das amostras beneficiadas e com o volume inicial das amostras recém – colhidas, foi possível obter os valores da produtividade por parcela, em kg, pela relação: produtividade = (volume total colhido na parcela * peso final de café beneficiado/5). Com o valor de produtividade em quilos por planta (produtividade por parcela/10) multiplicado pelo estande de plantas, no experimento (3.861 plantas ha⁻¹), foi possível obter a produtividade em kg por hectare que, posteriormente, foi transformada em sacas de 60 kg ha⁻¹, chegando, enfim, aos valores de produtividade.

Nessas mesmas parcelas, foram contabilizados os frutos que caíram ao chão antes da colheita. Para esse procedimento, foram coletados todos os frutos presentes no solo sob as plantas úteis e colocados, para secagem, dentro de sacos confeccionados de tela de polietileno com malha de 1,5mm. Após a meia seca (30% de umidade dos grãos), as amostras foram lavadas, separadamente, em caixas com água, para separação dos grãos de impurezas como torrões, paus e pedras oriundos da catação na lavoura. Depois de lavadas, as amostras foram, novamente, colocadas nos sacos de polietileno permanecendo ao sol até atingir 11% de umidade. Após isso, foram, também, descascadas e pesadas. O peso obtido na parcela foi dividido entre as suas plantas e somado à produção da planta para obtenção da produtividade total.

3.4.5 Custo de produção

Foi considerado, neste trabalho, apenas uma parcela dos custos operacionais do café, ou seja, insumos, mão de obra, mecanização além de

outros custos operacionais (contabilidade, telefone, taxas eventuais) necessários, para a produção em 1 hectare de café, na região de Lavras – MG e depreciações, nesse caso, relativas apenas à formação da lavoura, nessa mesma área, não sendo, portanto considerados os custos fixos relativos aos bens de capital (máquinas, implementos, equipamentos e benfeitorias) e nem a discriminação dos custos referentes à energia, pagamento de impostos, armazenamento, Pró-Labore e demais desembolsos envolvidos. Além da variabilidade destas informações, em condições reais de unidades produtivas, a não inserção destes dados visou à apresentação de informações mais concisas, uma vez que a correspondente parcela de custos se tornaria constante em todos os tratamentos.

O custo operacional aqui tratado foi composto pelos seguintes itens: operações mecanizadas, operações manuais, insumos, além da soma de 5% sobre os totais desses valores considerados como demais custos operacionais segundo Nasser et al. (2012). Essa parcela do custo representou o Custo Operacional Efetivo (COE). A esse custo foi somado o valor da depreciação da lavoura, obtendo-se, assim, o Custo Operacional Total (COT), sendo considerada uma vida útil de 15 anos para ela.

Para efeito de cálculo, foi considerado um período de 6 meses como fase de implantação da cultura, que envolveu os custos iniciais de implantação da lavoura e, após essa fase, um período de 6 a 18 meses considerado como formação inicial que se encerrou com a primeira florada. Em posse dos valores dos custos de formação, foi possível calcular o custo de depreciação, baseado na vida útil da lavoura. Após essas duas fases, consideradas como formação, realizou-se a avaliação dos custos envolvidos, em um ano agrícola, na fase de plena produção, inclusive, os fertilizantes nitrogenados utilizados. O cálculo do custo operacional foi composto, então, pelo custo na fase de produção, com custo variável entre os fertilizantes nitrogenados, acrescido da depreciação da

lavoura, baseado na metodologia proposta por Matsunaga et al. (1976) com adaptações.

Para a estimativa do custo, foi realizado um levantamento minucioso de todos os fatores de produção envolvidos (insumos, mão de obra e mecanização), assim como suas quantidades requeridas desde a implantação, formação e produção da lavoura utilizada nesse experimento. Em posse da descrição de todos esses fatores e suas quantidades utilizadas, foi feito um levantamento mensal entre os meses de janeiro a dezembro de 2015, no mercado local de Lavras/MG, do preço de cada um desses insumos, obtendo-se um valor médio, para cada produto (obtido pela média de preços entre lojas) e um valor médio entre os meses avaliados (obtido pela média entre os meses cotados). No caso específico da ureia aplicada de forma dissolvida, não foi considerado o custo de sua aplicação.

Para efeito da avaliação do retorno financeiro, proporcionado pelos tratamentos, foi feito o cálculo da margem líquida (TABELA 25) segundo a equação:

$$\text{Margem líquida} = [(\text{Produtividade} \times \text{Preço de venda}) - (\text{COT})]$$

Em que:

Produtividade: sacas de 60 kg de café por hectare.

Preço de venda: Reais por saca de 60 kg de café.

COT: Custo Operacional Total por saca de 60 kg de café.

3.5 Análises estatísticas dos dados

Para análise estatística dos dados relativos à produtividade, foi realizada análise conjunta dos anos 2015 e 2016, ambos sob efeitos dos tratamentos, sendo analisado, de forma separada, o ano de 2014 (sem efeito). O procedimento foi

adotado levando-se em consideração o efeito bienal da produtividade do cafeeiro. Para as demais variáveis foram realizadas análises individuais para cada avaliação.

Anteriormente à análise estatística, todos os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk. Na ocorrência de não normalidade foi realizada a transformação dos dados por meio da função $\text{Ln}(x)$. Após esse procedimento, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, no caso dos dados transformados, eles foram, novamente, transformados pela função $e^{(x)}$, para serem apresentados em tabelas ou figuras, representando uma aproximação dos dados originais.

Quando ocorreram diferenças significativas pelo teste F, ao nível mínimo de 5% de significância, os dados foram submetidos ao teste de médias de Skott-Knott para comparação entre os valores. Todas as análises foram realizadas pelo software Sisvar (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

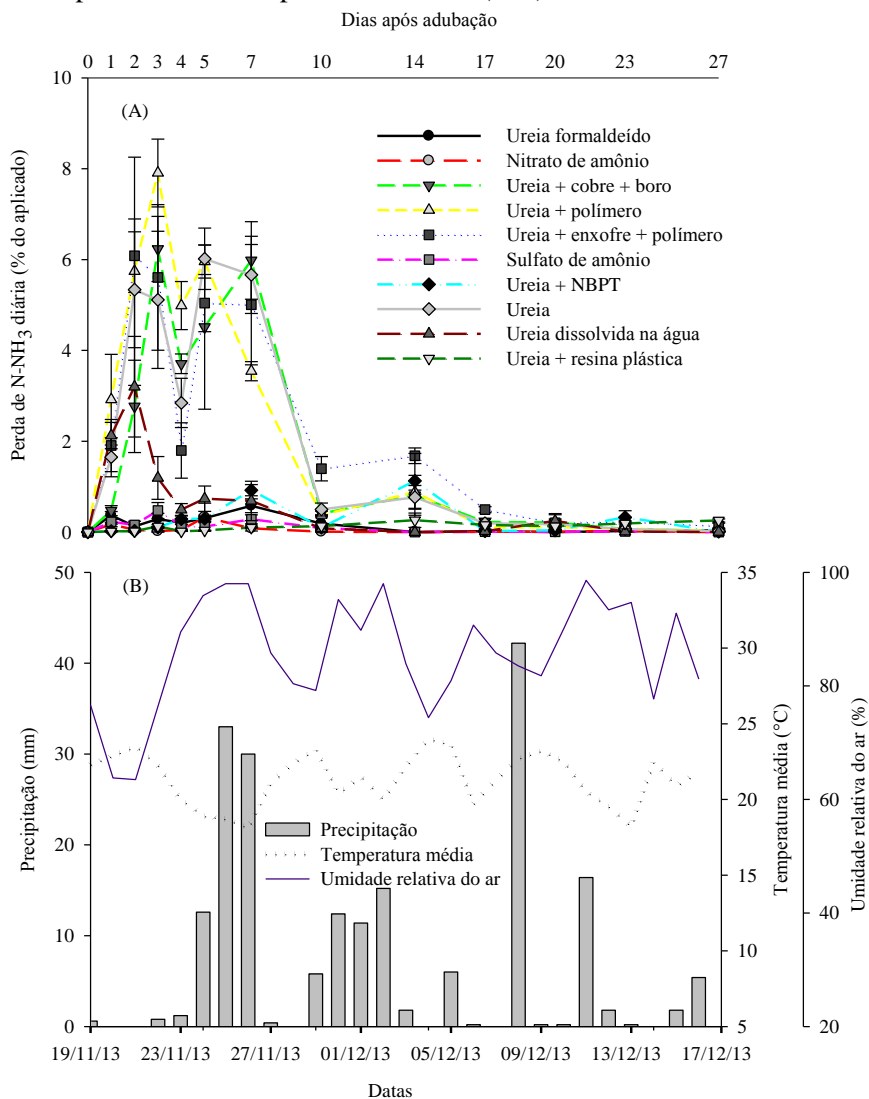
4.1 Primeiro ano (2013/2014)

Os resultados obtidos durante o primeiro ano de condução do experimento e suas discussões pertinentes se encontram a seguir.

4.1.1 Volatilização de amônia, pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes

As variações das perdas diárias de amônia, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, até os 27 dias após a primeira adubação nitrogenada do primeiro ano de avaliações, estão apresentados nas Figuras 2A e 2B.

Figura 2 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na primeira adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016)

A reação química que conduz à volatilização de amônia pode ser influenciada por fatores climáticos e do solo, sendo mais intensa, quando os

fertilizantes nitrogenados são aplicados, na superfície do solo, sem incorporação (ROCHETTE et al., 2013). O total de chuvas, nos primeiros 30 dias, após a primeira adubação nitrogenada, foi de 333,4 milímetros, com 0,6 mm, no dia em que foi realizada e 0,8; 1,2; 12,6; 33; 30 e 0,4 mm, no período entre 3 e 8 dias após a adubação, quando a temperatura média foi de 22,2° C (FIGURA 2B).

As perdas acumuladas de amônia dos fertilizantes, na primeira adubação, seguiu a seguinte ordem: ureia + polímeros aniônicos (32,6%) = ureia + S + polímeros (29,6%) = ureia convencional (28,3%) = ureia + Cu + B (25,4%) > ureia dissolvida em água (8,8%) > ureia + NBPT (3,3%) = ureia formaldeído (2,1%) = sulfato de amônio (1,5%) = ureia + resina plástica (1,4%) = nitrato de amônio (0,7%).

As perdas acumuladas e a volatilização diária apresentaram comportamento diferenciado ($p \leq 0,05$) entre os fertilizantes convencionais (ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia dissolvida em água), estabilizados (ureia + NBPT, ureia + 0,15% Cu e 0,4% de B e ureia + polímeros aniônicos) e de liberação lenta e controlada (ureia formaldeído, ureia + enxofre elementar (S^0) + polímeros e ureia + resina plástica).

A umidade relativa crítica da ureia tem mostrado ser de 74,3% a 30 ° C (MEESSEN; PETERSON, 2000), ou seja, sob uma temperatura de 30°C e umidade relativa superior a 74,3% este fertilizante começa a absorver água da atmosfera dando início ao processo de hidrólise e conseqüente volatilização de amônia. Vale ressaltar que, neste experimento, os valores de umidade foram superiores a 75%, em 23 dias de 30 dias de avaliação (FIGURA 2B), contribuindo para a rápida dissolução da ureia no solo e contribuindo, para os picos de volatilização, nos primeiros dias, após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados.

O uso de inibidores da nitrificação poderia contribuir para manter o N na forma amoniacal no solo provocando aumento da volatilização conforme a

reação: $[\text{NH}_4 + (\text{solução do solo}) + \text{OH}^- (\text{superfície camada de solo}) \rightarrow \text{NH}_3 \uparrow (\text{atmosfera}) + \text{H}_2\text{O}]$. Esta teoria é provada pelas elevadas perdas de N-NH₃ pela ureia + polímeros aniônicos que inibem a nitrificação utilizada nesse experimento (32,6% do aplicado na primeira adubação).

Na primeira adubação, um pico de volatilização da ureia (5,3%) aconteceu, no segundo dia, seguido de 5,1%, no terceiro dia, 2,8% no quarto dia, com um outro pico de 6,0% no quinto dia (FIGURA 2A). Atenta-se que 95% do total do N volatilizado foram perdidos nos primeiros sete dias. Observa-se, também, que, quando a ureia foi aplicada dissolvida em água, houve uma redução substancial das perdas de N-NH₃ (28,3% para 8,8% do total de N aplicado, acumulados), mostrando-se evidente a sugestão, para a utilização deste método, na prática da adubação nitrogenada do cafeeiro.

A ureia tratada com NBPT promoveu um atraso nos picos de perdas de N-NH₃, que ocorreram apenas entre o 10º e 14º dias após a sua aplicação. Alguns estudos têm demonstrado que a estabilização da ureia com o uso de inibidores de urease como NBPT proporcionam menores perdas de N por volatilização (CANTARELLA et al., 2008; GROHS et al., 2011; PEREIRA et al., 2009). O NBPT é constituído por uma cera com viscosidade reduzida de difícil manuseio, sendo sensível a altas temperaturas e umidade. Geralmente ele é misturado com solventes e, finalmente, adicionado à ureia (WHITEHURST; WHITEHURST, 2014).

Portanto o NBPT contribui, para reduzir e retardar a velocidade de volatilização, dando tempo para a dissolução da ureia na água, proveniente da chuva, reduzindo a volatilização provocada pela sua hidrólise rápida na superfície do solo. Essa ocorrência aumenta a absorção de N pelas culturas, resultando em rendimentos mais elevados (WATSON et al., 2008). No entanto a alta umidade do ar, após as adubações de nitrogênio, podem contribuir para dissolver a ureia + NBPT na ausência de chuvas, em razão da umidade relativa

crítica de fertilizantes ser menor do que a do ar, assim, absorvendo a umidade do ambiente.

Após ser aplicado ao solo, a molécula de NBPT é transformada em uma molécula análoga, o NBPTO, que reduz a atividade da urease no solo por agir no sítio ativo dessa enzima, explicando o atraso na conversão da ureia em amônia, depois de ter sido aplicado no solo, mostrada pela menor intensidade de volatilização.

As perdas diárias de amônia da ureia formaldeído foram sempre menores do que 0,6% , na primeira adubação, acumulando um total de perdas de 2,1% durante essa etapa do experimento. A ureia formaldeído é produzida pela polimerização de aldeídos, na presença de de ureia, sob condições controladas de pH, temperatura, proporção molar e tempo de reação, resultando em novas moléculas orgânicas de diferentes tamanhos e que afetam a solubilidade e a liberação do N ao solo (TRENKEL, 2010). Portanto menor quantidade de N, na solução do solo, será exposta a volatilização, ocorrendo maior sincronização da liberação de nutrientes e absorção pelas culturas.

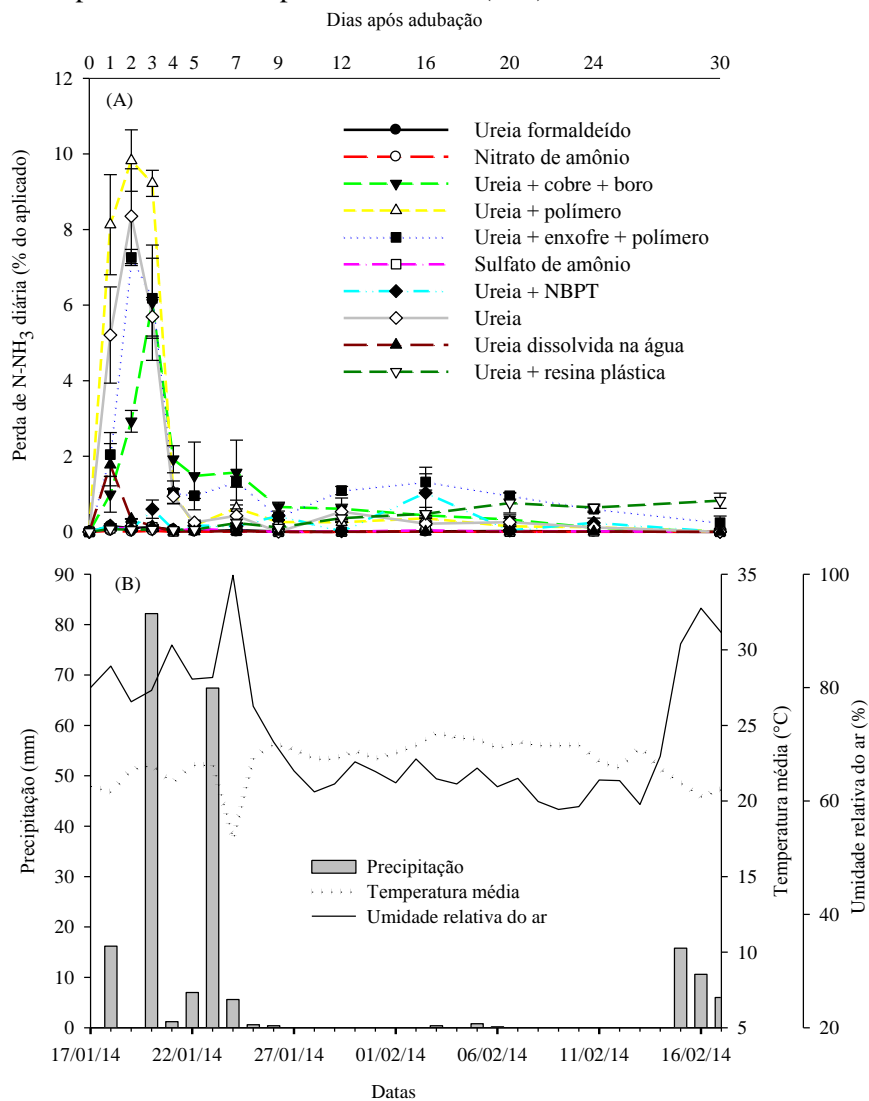
Além da influência do tamanho da molécula, a liberação de N da ureia formaldeído depende de atributos do solo (atividade biológica, teor de argila e pH) e condições climáticas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar). Assim, com temperaturas mais elevadas e sob intensa atividade microbológica, deve haver decomposição rápida de ureia formaldeído e o oposto em temperaturas mais baixas. Em condições de cultivo de café, no Brasil, predominam, de forma geral, temperaturas de médias a altas e consideráveis volumes de chuva, assim como observado neste experimento. No entanto verificou-se que mesmo assim houve lenta liberação das moléculas cotendo N desse fertilizante.

O fertilizante ureia + resina plástica não obteve altas perdas de N-NH_3 , sendo a volatilização máxima diária, entre o 5º e o 14º dia para essa fonte, com valores de 0,26% e 0,33% do total aplicado.

Na primeira adubação, os fertilizantes convencionais nitrato de amônio (0,7%) e sulfato de amônio (1,5%) obtiveram as menores perdas de N-NH_3 . Do mesmo modo, baixos valores de 1,29, 2,60, 2,24, 2,33% foram reportados a estas fontes, aplicados em cobertura, em comparação com 12,03, 20,74, 10,80, 19,12% da ureia comum (FENILLI et al., 2007).

O somatório das chuvas, nos primeiros 30 dias, após a segunda adubação nitrogenada sobre o experimento, foi de 274,3 mm, com 16,2 mm no dia da aplicação, seguido de 82; 1,2; 7; 67,4; 5,6; 0,6 e 0,4 mm no período entre 2º e 8º dias após a fertilização. A temperatura média, no período dos 30 dias avaliados, foi 23,1º C (FIGURA 3B). Pela elevada precipitação nesse período, as perdas diárias de N-NH_3 foram menores (FIGURA 3A).

Figura 3 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na segunda adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016)

As perdas acumuladas de amônia, na segunda adubação, seguiram a seguinte ordem: ureia + polímeros aniônicos (30,2%) > ureia + S + polímeros

(23,5%) = ureia (22,2%) > ureia + Cu + B (17,1%) > ureia + resina plástica (3,7%) = ureia + NBPT (2,9%) = ureia dissolvida em água (2,3%) > ureia formaldeído (0,6%) = sulfato de amônio (0,5%) = nitrato de amônio (0,1%)

As baixas perdas acumuladas da ureia formaldeído, na segunda aplicação, confirmam os baixos valores obtidos, na primeira aplicação, assim como para o sulfato de amônio e nitrato de amônio.

As maiores perdas de N-NH₃ ocorreram, nos primeiros três dias, após a adubação com utilização da ureia, assim distribuídas: 5,2, 8,4 e 5,7%, totalizando 22% do total aplicado somente, nesses dias, diminuindo com a ocorrência de maiores precipitações (FIGURA 3A). A dissolução de ureia em água (50 g L⁻¹) e a sua difusão, no perfil do solo, foram a causa provável, para a redução considerável das perdas de N dessa fonte, nesse período, correspondendo a 2,3% do N aplicado.

As perdas médias diárias de amônia da ureia + NBPT foram 0,17; 0,15 e 0,42% do total entre 6 e 8 dias após a aplicação. A partir do 12º até o 16º dia houve uma perda de 1% em quatro dias. Portanto a perda acumulada de N-NH₃ foi de 3% do total aplicado e, significativamente, mais baixo do que a ureia convencional ($p < 0,05$). Resultados semelhantes com essas duas fontes de N aplicadas ao café, adubado com 200, 400 e 600 kg ha⁻¹ de N, indicou a mesma tendência (SOUZA, 2012).

A máxima volatilização diária de N-NH₃ (pico) ocorreu com uso da ureia + polímeros aniônicos (9,8%), ureia (8,4%) e ureia + S⁰ + polímeros (7,3%), estas ocorrendo ao segundo dia. A ureia revestida com cobre e boro atrasou o pico de volatilização (6,1%) na segunda adubação (FIGURA 3A).

Cobre e boro, além de muitas outras substâncias, compostos e elementos químicos, promovem a inibição da atividade da urease no solo. Outro elemento químico que inibe a ação urease é o boro, rotineiramente, adicionado sob a forma de ácido bórico aos fertilizantes (H₃BO₃) para duas finalidades: fornecer o

elemento como nutriente e diminuir as perdas por volatilização. Em razão da semelhança estrutural com a ureia, a molécula de ácido bórico, também, é considerado como substrato análogo à urease. O ácido bórico pode substituir quase totalmente as moléculas de água ligadas ao N no centro de reação (BENINI et al., 2004).

Takashio et al. (1988) relataram que o cobre, zinco e mercúrio inibiram a atividade da urease em uma solução tampão de pH igual a 8,5 (valor ótimo para a atividade da urease) e temperatura constante de 37°C. Em uma concentração de 0,1 mM, em solução de cobre, a atividade relativa da urease foi de 13%. Para o zinco e mercúrio, a atividade relativa da urease foi de 50 e 13,5% em valores de 0,1 e 0,01 desses elementos químicos, respectivamente, em solução tamponada. Outros compostos químicos como acetoamidas, hidroxiiureia, semicarbazida, salicilamida, alantoína, hidantoína e asparagine, também, podem promover a inibição relativa da atividade de urease.

O efeito da adição de cobre e boro à ureia tem mostrado reduções nas perdas de N-NH₃, quando comparado com ureia convencional em milho, cana-de-açúcar e em condições laboratoriais (FARIA et al., 2013; JIANG et al., 2012; NASCIMENTO et al., 2013; WHITEHURST; WHITEHURST, 2014).

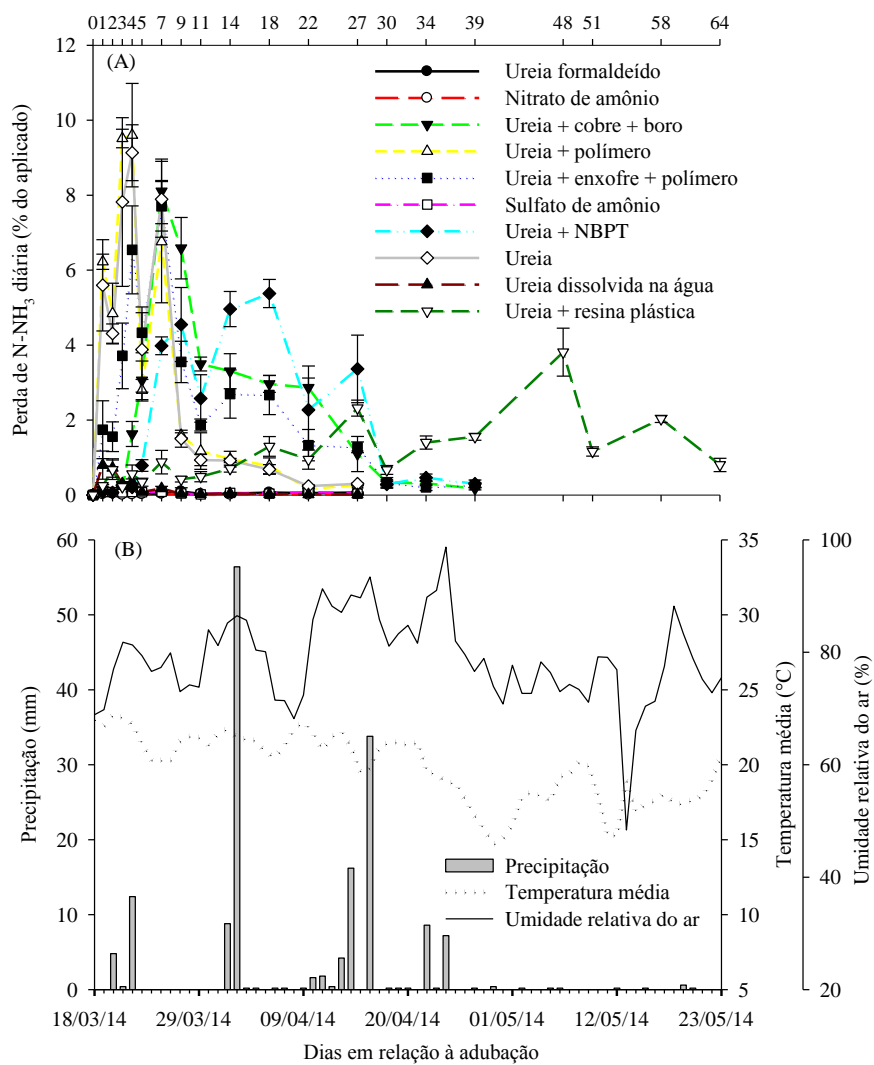
Considera-se que a ureia pode se difundir, para fora da zona de ação do cobre e do boro, tornando-os ineficientes na sua proteção. O cobre é, prontamente, imobilizado pela matéria orgânica no solo, enquanto a ureia pode se mover, livremente, com a umidade do solo por difusão. Levando-se em consideração que, neste trabalho, a ureia + Cu + B não foi capaz de inibir, totalmente, a volatilização, ocorrendo, ainda, níveis consideráveis de perdas, no entanto menores que a ureia comum, acredita-se que o cobre e o boro estejam sendo removidos dos grânulos pela umidade do sistema e deixando a ureia desprotegida.

Na segunda adubação, os fertilizantes nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia + resina plástica não apresentaram picos expressivos de volatilização de $N-NH_3$. A adição de resina plástica foi, portanto, eficaz na liberação gradual de N para a solução do solo. Na presença de água, a membrana plástica adicionada à ureia torna-se permeável e, por meio de difusão, permite a liberação de N do interior do grânulo (TRENKEL, 2010; YANG, 2012).

A liberação gradual de nitrogênio pelos adubos de liberação lenta possuem atributos vantajosos como a redução no número de aplicações que pode impactar na redução dos custos com essa operação, nas perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação (WANG; CUI; ZHOU, 2011). Além disso, o nitrogênio liberado de forma controlada contribui para a sincronia entre a liberação e a curva de absorção pela planta (TIMILSENA et al., 2014) o que garante maior aproveitamento do N aplicado.

A precipitação acumulada, durante a terceira adubação, foi de 159,6 mm, distribuídos em 4,8; 0,4; 12 e 4 mm no 2º, 3º, 4º e 5º dias, respectivamente, após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados, com temperatura média de 21,7º C nesse período. A umidade relativa do ar permaneceu acima de 75%, nos 16 dias decorrentes, após a aplicação dos tratamentos (FIGURA 4B).

Figura 4 - Representação gráfica da volatilização de amônia diária (A) e condições climáticas na área experimental (B) na terceira adubação nitrogenada do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016)

A avaliação das perdas do fertilizante ureia + resina foram avaliadas, até os 64 dias após adubação, em virtude da ocorrência de perdas desse tratamento até esse período, apresentando os maiores picos aos 7 e 48 dias.

As perdas acumuladas de amônia por volatilização, na terceira adubação, seguiram e seguinte ordem decrescente: ureia + polímeros aniônicos (44,7%) > ureia (43,2%) = ureia + S + polímeros (39,8%) > ureia + Cu + B (34,3%) > ureia + NBPT (29,5%) > + ureia resina plástica (20,5%) > ureia dissolvida em água (2,5%) = sulfato de amônio (0,7%) = ureia formaldeído (0,6%) = nitrato de (0,1%)

Na primeira, segunda e terceira adubação do experimento, foram observadas menores perdas de N-NH₃ por volatilização pelo nitrato de amônio e o sulfato de amônio, independentemente, das condições meteorológicas existentes.

As perdas acumuladas de N-NH₃ pela ureia e ureia + NBPT foram maiores nos períodos onde se registraram maior umidade relativa do ar com temperaturas altas e menor precipitação.

As perdas consideráveis, obtidas com a ureia + NBPT, embora se apresentassem altas, foram inferiores à ureia convencional, indicando que o tratamento da ureia com NBPT não impediu, totalmente, a volatilização sob os fatores climáticos predominantes da terceira adubação. Tem sido demonstrado, em algumas pesquisas que, sob estas condições, a molécula do NBPT tem sua estabilidade reduzida, tornando-se ineficaz para proteger a ureia da atividade da urease (ROBERTS, 2014; WHITEHURST; WHITEHURST, 2004). Portanto a aplicação da ureia + NBPT, em condições de alta umidade, ambiente pode reduzir seu efeito protetivo.

Embora, frequentemente, descrito na literatura que a redução no pH do solo reduz as perdas de N-NH₃, no caso de ureia tratada com NBPT, a volatilização tende a aumentar pela instabilidade do composto, em meio ácido,

situação encontrada, quando o fertilizante é colocado na superfície de solos ácidos, sem incorporação. Os picos de volatilização de ureia + NBPT foram mais intensos, na terceira adubação e ocorreram entre o 7º e o 27º dias após a adubação (FIGURA 4A). Esse fato pode estar ligado à maior acidez no solo verificada, durante essa adubação (TABELA 3), que maximizaram as perdas.

Para a ureia convencional, os picos, também, foram altos e mais cedo, ocorrendo com mais intensidade nos seguintes dias após a adubação: primeiro = 5,6%, segundo = 4,3%; terceiro = 7,8%; quarto = 9,1%; quinto = 3,9% e sexto = 7,9%.

O maior pico de volatilização da ureia + 0,15% Cu e 0,4% B ocorreu, no sétimo dia (8,1%), coincidindo com a ureia + S⁰ + polímeros (8,1%), apesar das perdas diárias de amônia em dias anteriores e posteriores atingirem valores, também, elevados. O mesmo aconteceu com a ureia + polímero aniônico, promovendo perdas de N-NH₃ de 9,6% no 3º dia após a aplicação. A ureia + resina plástica obteve perdas de 3,8% por volatilização, aos 48 dias, após a sua aplicação, atingindo valores próximos de zero aos sessenta e quarto dias.

As perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia, nas três adubações, podem ser observadas, de forma resumida, na Tabela 3.

Tabela 3 - Perdas acumuladas de N por volatilização de amônia (% do aplicado)

Fertilizante	Adubação			Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Ureia	28,6 a	22,2 b	43,2 a	31,2 b
Ureia + polímeros aniônicos	32,6 a	30,2 a	44,7 a	35,8 a
Ureia + S ⁰ +polímeros	29,6 a	23,5 b	39,8 a	30,9 b
Ureia + Cu + B	25,4 a	17,1 c	34,3 b	25,6 c
Ureia dissolvida	8,8 b	2,3 d	2,5 e	4,6 e
Ureia + NBPT	3,3 c	2,9 d	29,5 c	11,9 d
Ureia formaldeído	2,1 c	0,6 e	0,6 e	1,1 f
Sulfato de amônio	1,5 c	0,5 e	0,7 e	0,9 f
Ureia + resina	1,4 c	3,7 d	20,5 d	8,6 d
Nitrato de amônio	0,7 c	0,1 e	0,1 e	0,3 f
Média	13,4	10,3	21,6	15,1
Coeficiente de Variação (%)	22,3	15,1	18,5	13,1

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Observa-se pelos dados totais de volatilização que, na média geral, as perdas foram mais expressivas, na terceira adubação, fato relacionado às baixas precipitações ocorridas, nesse período, principalmente, em momentos de grande importância de chuvas como os primeiros dias após adubação. Ressalta-se, nesse caso, o grande aumento das perdas da ureia, que passou de 22,2% de perdas do aplicado, na segunda adubação, para 43,2% na terceira, assim também como a ureia + NBPT que apresentou 29,5% de perdas e a ureia + resina com 20,5% de perdas.

Em condições de altas temperaturas a molécula do NBPT tem sua eficiência reduzida, como já relatado em outros trabalhos, não conseguindo proteger os grânulos de ureia, de forma satisfatória, em momentos de falta de chuvas. Pelos dados obtidos, também, é possível observar que, nessas condições, a resina termoplástica, utilizada para proteger a ureia, não resistiu com grande eficiência às condições adversas de clima, ocorrendo perdas substanciais maiores que 20%.

Houve variação do pH do solo ($p \leq 0,05$), para os tratamentos com relação aos períodos avaliados, com exceção da ureia dissolvida em água e da ureia + Cu + B, constatando-se uma redução nos valores após a segunda adubação (TABELA 4). Entre os fertilizantes não foi observada diferença significativa.

Tabela 4 - Valores de pH do solo (0-5cm) nos tratamentos ao longo das adubações nitrogenadas no primeiro ano de condução do experimento.

Fertilizante	Adubação			
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª
Ureia	6,3 a	5,6 a	4,7 b	4,1 b
Nitrato de amônio	6,4 a	5,6 a	4,6 b	4,4 b
Sulfato de amônio	6,2 a	5,4 a	4,3 b	4,2 b
Ureia dissolvida em água	6,6 a	5,9 a	5,4 a	4,5 a
Ureia + NBPT	5,8 a	5,6 a	4,7 b	4,7 b
Ureia + Cu + B	5,8 a	5,7 a	4,9 a	4,9 a
Ureia + polímero aniônico	5,5 a	5,4 a	4,6 b	4,1 b
Ureia + S ⁰ + polímeros	6,2 a	5,4 a	4,3 b	3,8 b
Ureia + resina	5,9 a	5,8 a	4,0 b	4,1 b
Ureia formaldeído	6,1 a	5,5 a	4,2 b	4,1 b
Média	6,05 a	5,58 b	4,56 c	4,30 c

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

O pH da camada superficial do solo (0-5 cm) é um dos atributos químicos que mais afetam a volatilização de amônia para a atmosfera, aumentando seus valores e acelerando as perdas (MENENDEZ et al., 2009; WATSON et al., 2008). Neste estudo, o pH do solo, na camada de 0-5 cm, sofreu reduções em valores médios de 6,05 para 4,30.

Com aplicação de nitrogênio, na forma de ureia + enxofre elementar e polímeros, as variações foram de 6,2 a 3,8 . O enxofre elementar (S^0), contido nessa fonte, produziu íons H^+ com a seguinte reação: $S^0 + CO_2 + \frac{1}{2} O_2 + 2H_2O \rightarrow [CH_2O] + SO_4^{2-} + 2H^+$, enquanto amônio era transformado no solo pelo processo de nitrificação: $NH_4^+ + O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$.

O processo de acidificação do solo, decorrente das adubações, é recorrente, nas lavouras cafeeiras, levando-se em consideração as altas doses de fertilizantes utilizadas na cultura e o alto poder acidificante dos adubos (formação de H^+). Esse fato pode acabar reduzindo as volatilizações de alguns fertilizantes, porém alguns processos químicos importantes, como a absorção de nutrientes, podem ser prejudicados.

Na avaliação dos teores foliares de nitrogênio das plantas, observou-se que, mesmo com perdas substanciais de nitrogênio por volatilização, os teores foliares do nutriente permaneceram iguais, estatisticamente, entre os fertilizantes avaliados ($p < 0,05$), ocorrendo diferenças apenas entre as épocas avaliadas (TABELA 5).

Tabela 5 - Teores foliares de nitrogênio ($g\ kg^{-1}$) durante o primeiro ano de condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1 ^a	Antes da 2 ^a	Antes da 3 ^a	Após a 3 ^a	
Ureia	32,0 a	27,2 b	26,3 b	25,8 b	27,8
Nitrato de amônio	31,2 a	28,5 b	28,9 b	25,5 c	28,5
Sulfato de amônio	30,1 a	28,3 b	27,0 b	26,8 b	28,1
Ureia dissolvida em água	29,8 a	28,8 a	28,7 a	26,0 b	28,3
Ureia + NBPT	30,3 a	28,1 a	28,8 a	25,3 b	28,1

Tabela 5 - Teores foliares de nitrogênio (g kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento. (Conclusão)

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia + Cu + B	28,9 a	26,6 a	27,6 a	25,0 a	27,0
Ureia + polímero aniônico	31,1 a	27,3 b	27,6 b	24,9 c	27,8
Ureia + S ⁰ + polímeros	31,8 a	28,1 b	26,8 b	26,7 b	28,3
Ureia + resina	29,7 a	28,2 a	26,7 b	24,7 b	27,3
Ureia formaldeído	31,0 a	28,2 b	28,1 b	25,6 c	28,2
Média	30,6 a	27,9 b	27,6 b	25,6 c	
Faixas críticas ⁽¹⁾	28 a 32	28 a 31	26 a 31	28 a 31	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. (1) Faixas críticas dos teores foliares segundo Malavolta (1992).

Os teores de N, considerados adequados (MALAVOLTA, 1992), foram encontrados somente antes da primeira adubação. Antes da segunda adubação, somente o tratamento com ureia dissolvida em água apresentou teor adequado ($28,8\text{g kg}^{-1}$) e, antes da terceira adubação, o nitrato de amônio e ureia + NBPT proporcionaram teores adequados. Após a terceira adubação, todos os tratamentos proporcionaram teores de N foliar abaixo da faixa crítica adequada, para a cultura do café, no Sul de Minas Gerais.

Acredita-se que o alto nível de matéria orgânica, contida no solo antes do início dos tratamentos ($6,9\text{ g kg}^{-1}$), aliado às altas doses de nitrogênio empregadas nas adubações (450 kg ha^{-1}), tenham contribuído para nutrir com nitrogênio, de forma satisfatória, as plantas do experimento, inibindo possíveis deficiências e mantendo as folhas com seus teores adequados.

Segundo Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999), as recomendações de nitrogênio para as culturas, entre elas o café, é realizada já com a contabilização de perdas na ordem de 50% de nitrogênio por volatilização decorrentes do uso generalizado da ureia na agricultura. Nesse caso, então, a aplicação de fontes

onde as perdas são bastante reduzidas, como as observadas neste trabalho, poderiam até configurar excesso do nutriente na folha. No entanto esse fato não ocorreu, provavelmente, por outras fontes de perdas não avaliadas, como a lixiviação ou formação de óxido nitroso.

Observou-se, de forma geral, que os teores foliares de nitrogênio decresceram com o tempo, à exceção do uso da ureia + Cu + B, pela, provavelmente, evolução no crescimento dos frutos que demandou maior quantidade de nitrogênio das folhas, para seu desenvolvimento, ficando os teores, inclusive, abaixo das faixas críticas consideradas ideais, para o nutrientes (MALAVOLTA, 1992), na avaliação realizada sessenta dias após a última adubação.

Um dos motivos que pode ter ocasionado os baixos teores foi a metodologia empregada na adubação, com aplicação dos fertilizantes em faixa única em apenas um dos lados da linha de plantio (“lado de cima”), o que poderia concentrar a absorção dos nutrientes em uma dos lados da planta. Nesse caso, como a coleta de folhas para análise foi realizada, em ambos lados da planta, pode ter ocorrido efeito diluição dos nutrientes entre as folhas mais e menos nutridas, interferindo nos resultados.

Para os teores foliares de enxofre, cobre e boro, no primeiro ano de condução do experimento, não foram constatadas diferenças significativas entre as fontes aplicadas, nem mesmo entre aquelas que continham tais nutrientes, em maiores quantidades, como foi o caso da ureia + Cu + B, ureia + S + polímeros e o sulfato de amônio. Foram observadas diferenças apenas entre as épocas avaliadas, para todos os três nutrientes, conforme Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 - Teores foliares de enxofre (g kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1 ^a	Antes da 2 ^a	Antes da 3 ^a	Após a 3 ^a	
Ureia	3,0 a	2,4 b	2,3 b	2,0 b	2,4
Nitrato de amônio	3,2 a	2,4 b	2,1 b	1,8 b	2,4
Sulfato de amônio	3,0 a	2,7 a	2,4 b	2,2 b	2,6
Ureia dissolvida em água	2,6 a	2,1 a	2,3 a	1,9 a	2,2
Ureia + NBPT	2,7 a	2,3 a	2,1 b	1,8 b	2,2
Ureia + Cu + B	3,0 a	2,2 b	2,3 b	1,8 b	2,4
Ureia + polímero aniônico	2,7 a	2,4 a	2,5 a	1,9 b	2,4
Ureia + S ⁰ + polímeros	3,4 a	2,8 b	2,5 b	2,1 c	2,7
Ureia + resina	3,0 a	2,4 b	2,4 b	1,9 b	2,4
Ureia formaldeído	3,0 a	2,6 a	2,2 b	2,0 b	2,5
Média	3,0 a	2,4 b	2,3 b	1,9 c	
Faixas críticas ⁽¹⁾	1,6 a 2,3	1,8 a 2,3	2,1 a 2,4	1,8 a 2,1	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares segundo Malavolta (1992)

Quanto aos teores foliares de boro, foram observados que os níveis ficaram abaixo da faixa crítica, para o cafeeiro, nas diferentes épocas consideradas, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Teores foliares de boro (mg kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia	37,6 a	44,6 a	51,0 a	9,0 b	35,5
Nitrato de amônio	35,6 b	48,2 a	46,8 a	22,7 c	38,3
Sulfato de amônio	39,1 b	60,4 a	54,1 a	21,8 c	43,9
Ureia dissolvida em água	40,1 a	44,4 a	45,3 a	25,8 b	38,9
Ureia + NBPT	42,7 a	49,9 a	46,3 a	22,6 b	40,4
Ureia + Cu + B	37,1 a	43,6 a	45,9 a	12,5 b	34,8
Ureia + polímero aniônico	39,4 b	48,1 b	55,1 a	28,1 c	42,7
Ureia + S ⁰ + polímeros	38,0 b	48,9 a	49,5 a	21,6 b	39,5
Ureia + resina	40,9 a	45,2 a	52,5 a	29,0 b	42,0
Ureia formaldeído	39,9 a	45,5 a	46,0 a	20,6 b	38,0
Média	39,0 b	47,9 a	49,3 a	21,4 c	
Faixas críticas ⁽¹⁾	50 a 80	50 a 90	60 a 80	50 a 70	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares segundo Malavolta (1992)

Para os teores foliares de cobre não foram observados valores abaixo da faixa crítica recomendada para o cafeeiro (TABELA 8).

Tabela 8 - Teores foliares de cobre (mg kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento. (Continua)

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia	25,2 b	18,9 b	35,9 a	20,5 b	25,1
Nitrato de amônio	24,5 a	12,9 b	23,0 a	13,9 b	18,6
Sulfato de amônio	26,3 a	14,9 b	34,3 a	20,1 b	23,9
Ureia dissolvida em água	26,3 b	14,5 c	38,7 a	22,5 b	25,5
Ureia + NBPT	25,0 a	16,5 a	19,8 a	14,1 a	18,8
Ureia + Cu + B	24,1 a	13,5 b	31,3 a	22,3 a	22,4

Tabela 8 - Teores foliares de cobre (mg kg^{-1}) durante o primeiro ano de condução do experimento. (Conclusão)

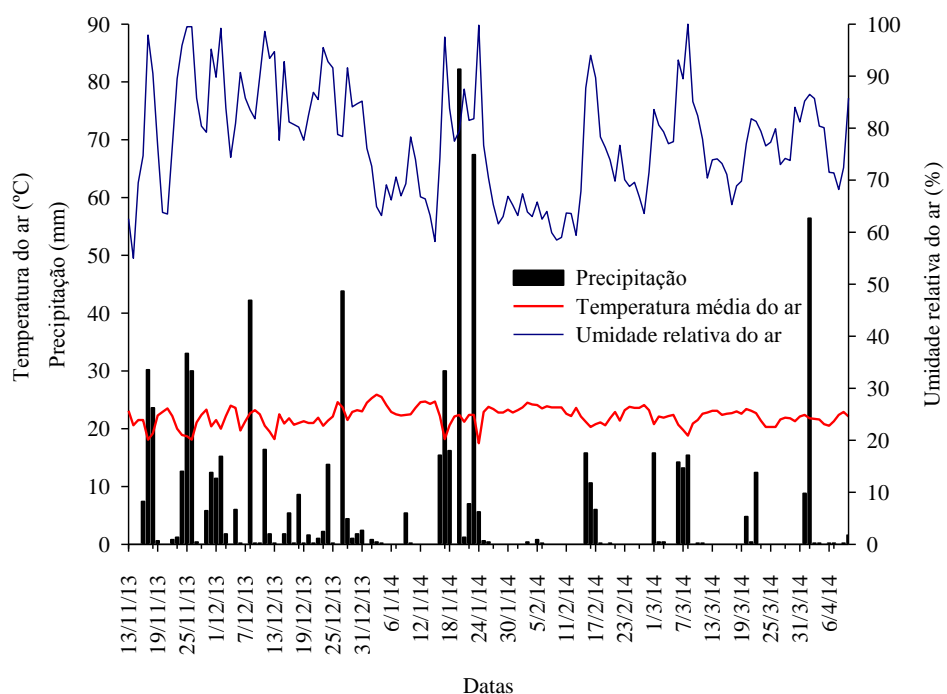
Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia + polímero aniônico	24,7 a	15,2 b	31,2 a	19,1 b	22,4
Ureia + S ⁰ + polímeros	26,3 a	15,3 b	30,4 a	17,6 b	22,8
Ureia + resina	26,2 a	16,6 b	31,0 a	19,0 b	23,2
Ureia formaldeído	27,4 a	16,8 b	24,9 a	17,8 b	21,7
Média	25,6 a	15,5 b	30,0 a	18,7 b	
Faixas críticas ⁽¹⁾	10 a 20				

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares segundo Malavolta (1992).

4.1.2 Emissões de CO₂

As condições climáticas, ocorridas na área experimental, entre a primeira adubação e o final das avaliações da terceira adubação, encontram-se na Figura 5.

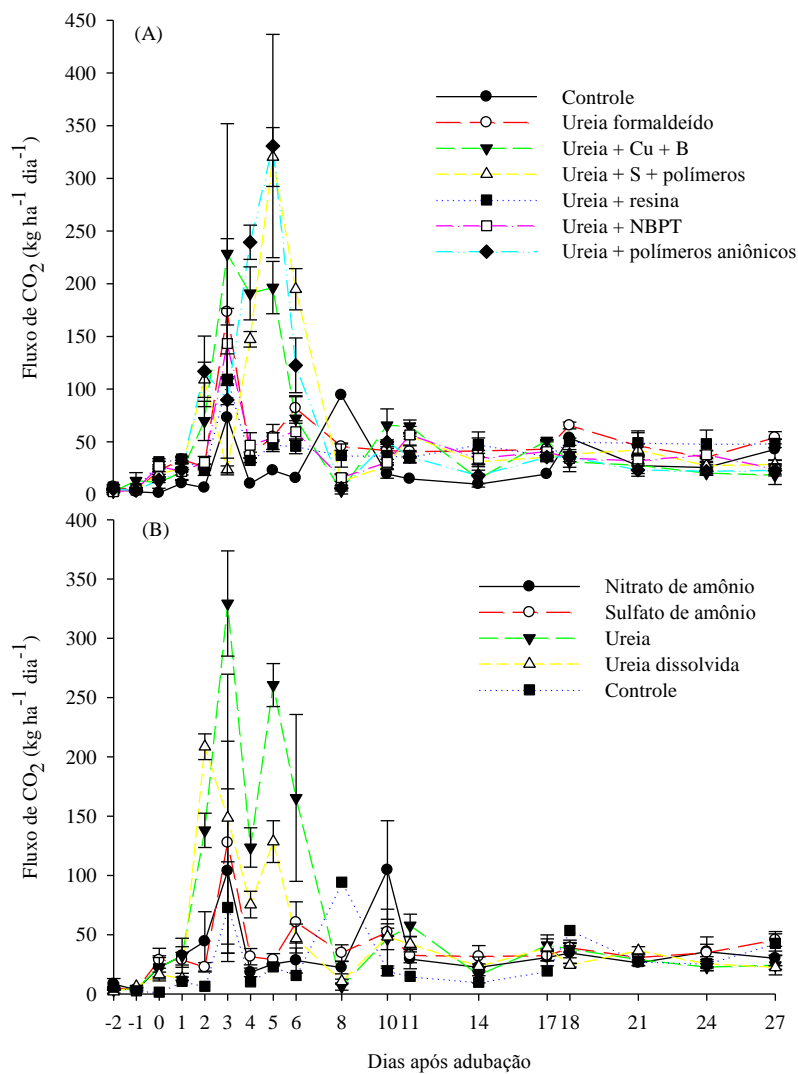
Figura 5 - Temperatura média do ar, volumes de precipitações e umidade relativa do ar no período concentrado entre a primeira adubação e o fim das avaliações de fluxo de CO₂ da terceira adubação.



Fonte: Do autor (2016)

Os fatores climáticos como temperatura do ar e chuvas influenciaram, de forma significativa, as emissões de CO₂ pelos fertilizantes nitrogenados em todas as adubações. Segundo Rastogi, Singh e Pathak (2002), a temperatura tem um efeito marcante sobre as emissões de CO₂ do solo, citando as temperaturas entre 20 e 40 °C como as mais expressivas para tais emissões. Os dados de fluxo diário de CO₂ da primeira adubação dos fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, liberação lenta e controlada estão representados na Figura 6.

Figura 6 - Representação gráfica dos fluxos de CO₂ oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na primeira adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016)

A ocorrência de chuvas, em especial, pode acentuar o fluxo de CO₂ do solo. Esse evento é causado pela reativação da atividade de respiração heterotrófica devido a uma recuperação da atividade microbiana no solo (BORKEN; MATZNER, 2009). Nesse caso, os microorganismos heterotróficos presentes no solo produzem CO₂ ao atuarem na degradação de compostos orgânicos do sistema.

Observa-se pelos resultados obtidos, na primeira adubação, que os fluxos de CO₂ são, significativamente, mais intensos nas parcelas com aplicação de fertilizantes em comparação ao tratamento controle sem adubação nitrogenada. A adição de nitrogênio ao solo acelera a atividade microbiana, acelerando, também, a decomposição de resíduos orgânicos no solo com posterior emissão de CO₂ pela atmosfera. Somado a esse fator ocorre o despreendimento natural do carbono da molécula da ureia na forma de CO₂ pelo processo de hidrólise que é acelerado pela ocorrência de chuva.

Independentemente do uso da ureia, na sua forma granulada ou dissolvida em água, neste experimento, as emissões de CO₂ por esse fertilizante foi, expressivamente, maior do que os outros nitrogenados convencionais, sulfato de amônio e nitrato de amônio. Durante o seu processo de fabricação, moléculas de carbono são adicionadas às de amônio, com ação de calor, para produção da ureia $[\text{NH}_4^+\text{CNO}^- \rightarrow (\text{NH}_2)_2\text{CO}]$, processo este que não é verificado na produção dos demais nitrogenados convencionais. Dessa forma, durante o processo de hidrólise, a ureia libera, na forma de CO₂, o carbono a ela incorporado, o que explica sua maior contribuição, nas emissões desse gás, conforme reações de hidrólise da ureia, anteriormente, explicadas. Fertilizantes produzidos à base de ureia, com aditivos para sua proteção, apresentaram, também, níveis significativos de emissão de CO₂.

No segundo dia após a primeira adubação, verificou-se um pico no fluxo de CO₂ da ureia dissolvida em água (208,6 kg ha⁻¹ dia⁻¹), valor este,

significativamente, maior do que todos os demais fertilizantes nesse dia, reduzindo os fluxos após essa data. O fato desse tratamento ter sido dissolvido em água acelerou o processo de hidrólise da ureia liberando, de forma mais imediata, o CO_2 para a atmosfera, representando o primeiro pico de fluxo desse gás em comparação aos demais fertilizantes.

Os maiores fluxos de CO_2 durante o período avaliado, ocorreram no terceiro e quinto dia após adubação, provenientes da ureia ($329,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e ureia + polímeros aniônicos ($330,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Anteriormente ao dia da adubação, foi registrado um volume de chuvas de 61,2 mm, no experimento, fato que contribuiu, para o aumento substancial nos fluxos, já ao segundo e terceiro dias após adubação. Outros picos foram observados com a ureia + Cu + B ($228,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), ao terceiro dia e aos cinco dias, após adubação pela ureia + polímeros aniônicos ($330,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), ureia + S + polímeros ($320,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), ureia ($260,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), novamente, pela ureia + Cu + B ($196,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e ureia dissolvida ($128,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

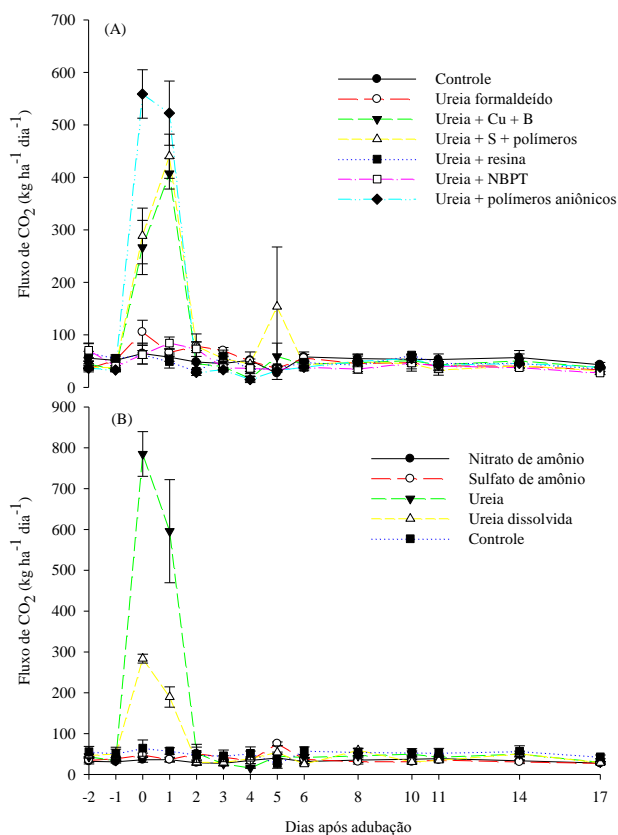
Embora alguns desses fertilizantes apresentem proteção contra ação da hidrólise da ureia, essa não foi, totalmente, efetiva para inibi-la e conter maiores emissões de CO_2 , pois fica evidente que, após a ocorrência da chuva, desencadeou-se o processo da hidrólise da ureia entre os fertilizantes, fato que, também, é observado nos resultados obtidos pela volatilização de amônia.

Os fertilizantes ureia + resina plástica, ureia + NBPT, nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído apresentaram os menores fluxos de CO_2 comparado aos demais na primeira adubação, visto que entre eles os maiores picos de fluxo foi observado pela ureia formaldeído, ao terceiro dia após adubação, este de $173,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, pelo sulfato de amônio, também, nesse dia ($127,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e pelo nitrato de amônio, aos três e dez dias, após adubação ($103,7$ e $104,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, respectivamente). Observa-se que, embora tenham

ocorrido os picos, esses foram, significativamente, inferiores aos observados por outros fertilizantes já citados.

Na segunda adubação do experimento, a ocorrência de uma chuva de 16 mm logo, após a aplicação dos fertilizantes, proporcionou um pico no fluxo de CO_2 pela ureia de $784,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no mesmo dia da adubação e $595,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no dia subsequente (FIGURA 7).

Figura 7 - Representação gráfica dos fluxos de CO_2 oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na segunda adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média ($n=3$)



Fonte: Dados do autor (2016)

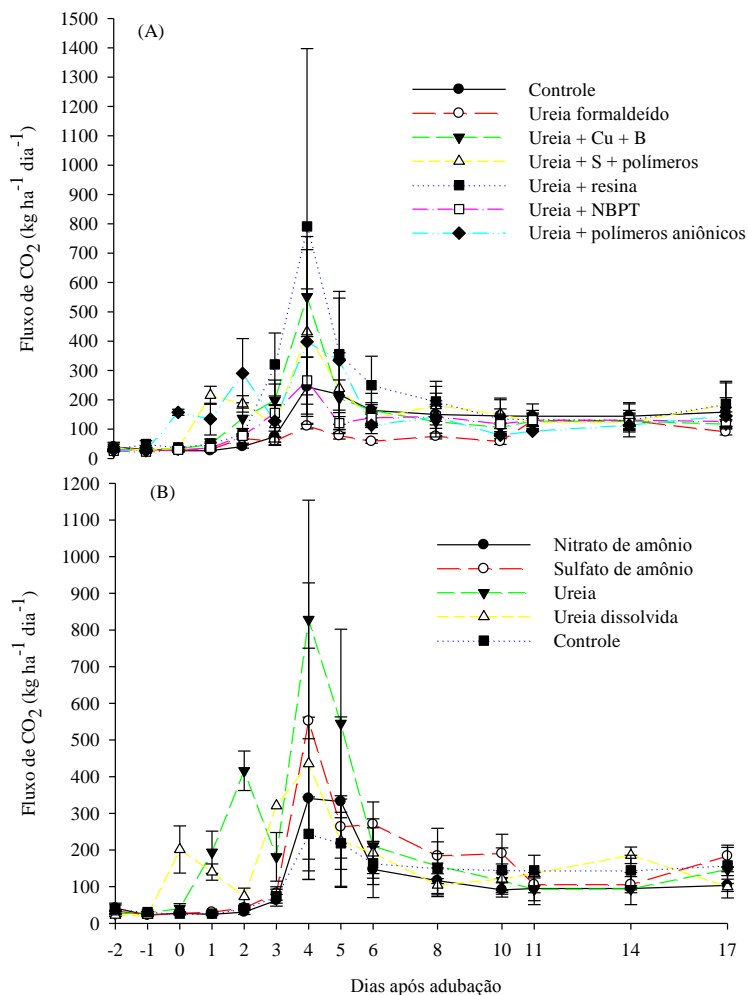
Este comportamento do fluxo de CO₂, após ocorrência de chuvas, também, foi observado por Moitinho et al. (2013) e Morell et al. (2011), na cultura da cana-de-açúcar, com chuvas de 21 e 10,2 mm, respectivamente.

Também, imediatamente, após a adubação, a ureia + polímeros aniônicos observou-se um pico no fluxo de CO₂ (558,9 kg ha⁻¹ dia⁻¹) e outro um dia após adubação (522,4 kg ha⁻¹ dia⁻¹). Além da ureia dissolvida em água e ureia + S + polímeros, que apresentaram fluxos de 283,2 e 288,5 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de CO₂, respectivamente, após a adubação e a chuva ocorrida.

Seguida da ureia, os maiores picos observados, nessa adubação, foram constatados pela ureia + S + polímeros (440,3 kg ha⁻¹ dia⁻¹) e pela ureia + Cu + B (407,2 kg ha⁻¹ dia⁻¹), no primeiro dia após adubação, estes valores, significativamente, menores do que os obtidos pela ureia convencional.

Na terceira adubação, imediatamente após a aplicação dos fertilizantes, observou-se um pico no fluxo de CO₂ pela ureia dissolvida em água (201,26 kg ha⁻¹ dia⁻¹) (FIGURA 8).

Figura 8 - Representação gráfica dos fluxos de CO₂ oriundos dos fertilizantes estabilizados, de liberação lenta e controlada e do tratamento controle (A) e dos fertilizantes convencionais e controle (B) na terceira adubação do ano 2013/2014. Obs.: As barras verticais representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016)

Um dia após a adubação, os maiores fluxos de CO₂ foram observados pela ureia + S0 + polímeros (215,46 kg ha⁻¹ dia⁻¹), significativamente, igual aos

valores observados com uso da ureia convencional ($193,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e ureia dissolvida em água ($139,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$).

Embora a ureia dissolvida em água apresente picos antecipados nos fluxos de CO_2 pela sua hidrólise acelerada, ocorre, também, sua rápida incorporação ao solo reduzindo, drasticamente, esses fluxos com o passar dos dias.

Nesta adubação, os maiores valores de fluxo de CO_2 foram observados pela ureia, de $828,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, pela ureia + resina de $791,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, ureia + Cu + B ($551,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) e pelo sulfato de amônio ($551,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), ao quarto dia após a adubação, valores esses, significativamente, iguais.

Os dados acumulados de fluxo de CO_2 , em cada uma das adubações, podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores acumulados dos fluxos de CO_2 (kg ha^{-1}) obtidos com os diferentes fertilizantes nas três adubações. (Continua)

Fertilizante	Adubação			Média ⁽¹⁾
	1 ^a	2 ^a ⁽¹⁾	3 ^a	
Controle	825,9b	1037,2d	3022,4a	1618,6b
Ureia	1769,1a	2109,4a	4575,2a	2813,7a
Nitrato de amônio	1003,5b	662,6e	2720,5a	1445,7b
Sulfato de amônio	1060,1b	735,9e	3668,6a	1804,3b
Ureia dissolvida em água	1273,5b	1191,1c	2947,4a	1768,2b
Ureia + NBPT	1116,7b	872,82d	2686,6a	1559,3b
Ureia + Cu + B	1502,3a	1446,4b	3234,5a	2054,4a
Ureia + polímero aniônico	1542,3a	1792,6a	3094,4a	2119,1a
Ureia + S ⁰ + polímeros	1624,9a	1607,5b	3553,0a	2222,6a

Tabela 9 - Valores acumulados dos fluxos de CO₂ (kg ha⁻¹) obtidos com os diferentes fertilizantes nas três adubações. (Conclusão)

Fertilizante	Adubação			Média ⁽¹⁾
	1 ^a	2 ^a ⁽¹⁾	3 ^a	
Ureia + resina	1263,6b	945,5d	3936,5a	1983,0a
Ureia formaldeído	1408,5a	992,6d	1799,9a	1399,4b
Média	1308,2	1143,3	3205,7	1852,1
Coefficiente de variação (%)	19,23	1,4	32,53	2,53

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ¹ Análise de variância com dados transformados por Ln (x) e apresentados com aproximação por e^x

Com os dados acumulados de fluxo de CO₂, observa-se que, de forma geral, houve fluxo mais intenso do gás, na terceira adubação, em relação às demais. Após a terceira adubação, foi registrada a primeira chuva significativa (12 mm), aos quatro dias após adubação, coincidindo com os primeiros picos de fluxo de CO₂ dos fertilizantes (FIGURA 8). Após essa data, a próxima chuva foi registrada somente aos quatorze dias, contabilizando, então, um período de dez dias sem chuvas com a permanência de umidade no solo remanescente da chuva anterior. Ou seja, iniciou-se o processo de hidrólise da ureia com a chuva de 12 mm, a qual não foi suficiente, para incorporar todo fertilizante ao solo, ficando estes expostos à superfície e vulneráveis aos processos de perdas de amônia por volatilização (FIGURA 4) e acentuando os fluxos de CO₂.

Alguns estudos, avaliando intensidade de fluxo de CO₂ oriundos de fertilizantes nitrogenados, foram realizados, em todo mundo, havendo resultados divergentes entre eles. Segundo Tian et al. (2015), avaliando a emissão de CO₂ com a utilização de ureia, ureia + NBPT, ureia + DCD (inibidor da nitrificação) e ureia recoberta com polímeros na adubação nitrogenada do algodoeiro, no Mississippi - EUA, não verificaram diferenças significativas na emissão entre

esses fertilizantes, em dois anos de avaliação. Sistani et al. (2010) não encontraram diferenças na emissão de CO₂ dos fertilizantes, utilizados em relação ao tratamento controle (sem adubação), relatando haver maior influência da emissão relacionado aos fatores climáticos na área.

Porém, em trabalhos de Choi et al. (2011), foi observada uma maior emissão do CO₂ pela ureia, seguida pelo sulfato de amônio, nitrato de amônio e nitrato de potássio, nessa ordem. Esses resultados corroboram com os encontrados, neste estudo, onde, na média geral acumulada, a ureia convencional e a ureia revestida com polímeros, resina, enxofre, cobre e boro apresentaram maiores fluxos do que os demais fertilizantes, inclusive, o nitrato e sulfato de amônio. Acredita-se que as diferenças entre os comportamentos dos fertilizantes, nos trabalhos citados, estejam relacionadas às variações edafoclimáticas regionais, principais fatores concorrentes para o processo de emissão de CO₂.

São escassos os trabalhos envolvendo fluxo de dióxido de carbono oriundos de fertilizantes nitrogenados na cafeicultura. Belizário (2013) avaliou emissão de dióxido de carbono, na cultura do cafeeiro adubada com nitrato de amônio, nitrato de cálcio, ureia e ureia + NBPT, verificando que as maiores emissões ocorreram com utilização da ureia e ureia + NBPT. A autora avaliou, também, a emissão oriunda diretamente da calagem da cultura. Nessa circunstância, encontrou um valor de fluxo de 64,7 g de C-CO₂ m⁻², o que equivale, nesse caso, a 647 kg ha⁻¹.

Segundo estudos de Oliveira Júnior et al. (2015), a atividade cafeeira emite 2,13 tCO₂ eq ha⁻¹, baseando-se no somatório de todas as fontes de emissão do gás na propriedade, como utilização de combustíveis fósseis, corretivos e fertilizantes e em índices pré-determinados por pesquisas.

4.2 Segundo ano (2014/2015)

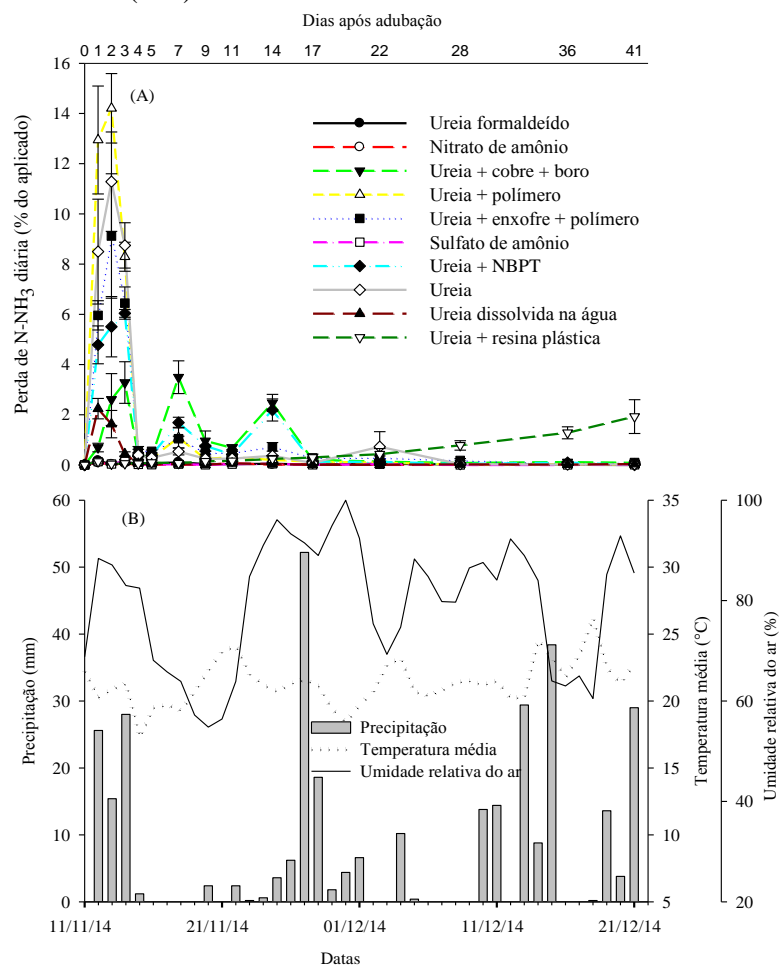
Os resultados obtidos no segundo anos de avaliações do experimento e as discussões pertinentes estão a seguir.

4.2.1 Volatilização de amônia, pH superficial do solo e teores foliares de nutrientes

Foram observadas diferenças significativas nas perdas diárias e acumuladas de amônia por volatilização ($p < 0,05$), quanto às diferentes fontes, nas três adubações realizadas. Houve grande influência de variáveis climáticas, como chuvas e temperaturas para a ocorrência das perdas.

Na primeira adubação, foram observadas maiores concentrações de perdas por volatilização de amônia entre o primeiro e terceiro dia após a aplicação dos fertilizantes (FIGURA 9A).

Figura 9 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na primeira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016).

As perdas acumuladas na primeira adubação do segundo ano foi: ureia + polímero aniônico (38%) > ureia (32%) > ureia + S + polímeros (27%) = ureia + NBPT (23%) > ureia + Cu + B (16%) > ureia + resina plástica (6%) = ureia dissolvida em água (5%) = ureia formaldeído (1%) = sulfato de amônio (1%) = nitrato de amônio (0,3%).

O maior pico de volatilização ocorreu, no segundo dia após a adubação, observou-se que a ureia revestida com polímero aniônico provocou maiores perdas (14% do total de N aplicado), seguida pela ureia (11%) e ureia + enxofre + polímeros (9%). Os picos de volatilização, geralmente, ocorrem, nos primeiros dias após aplicação dos fertilizantes, pelo contato do fertilizante com o solo, sofrendo, assim, a imediata ação da urease. Segundo Rojas et al. (2012), as maiores perdas de nitrogênio por volatilização ocorrem, nos cinco primeiros dias após a adubação, sendo, altamente, influenciadas pelo volume de chuvas.

Durante as avaliações da primeira adubação, foi registrado um total de 331 mm de chuva no experimento, com um total de 70 mm somente entre o primeiro e o quarto dia após a adubação (FIGURA 9B), fato que inibiu a ocorrência de grandes picos de volatilização por promover a incorporação rápida dos fertilizantes ao solo.

A incorporação do polímero aniônico à ureia não foi capaz de reduzir as perdas por volatilização de amônia, fazendo ocorrer a sua acentuação quando comparado à ureia convencional (FIGURA 9A). O polímero utilizado é solúvel em água, portanto, em contato com a chuva e a umidade do solo, dissolve-se, expondo o fertilizante às condições ambientais, facilitando as perdas por volatilização. Além disso, os polímeros aniônicos inibem o processo de nitrificação, mantendo o N na forma amoniacal no solo, maximizando os processos de volatilização.

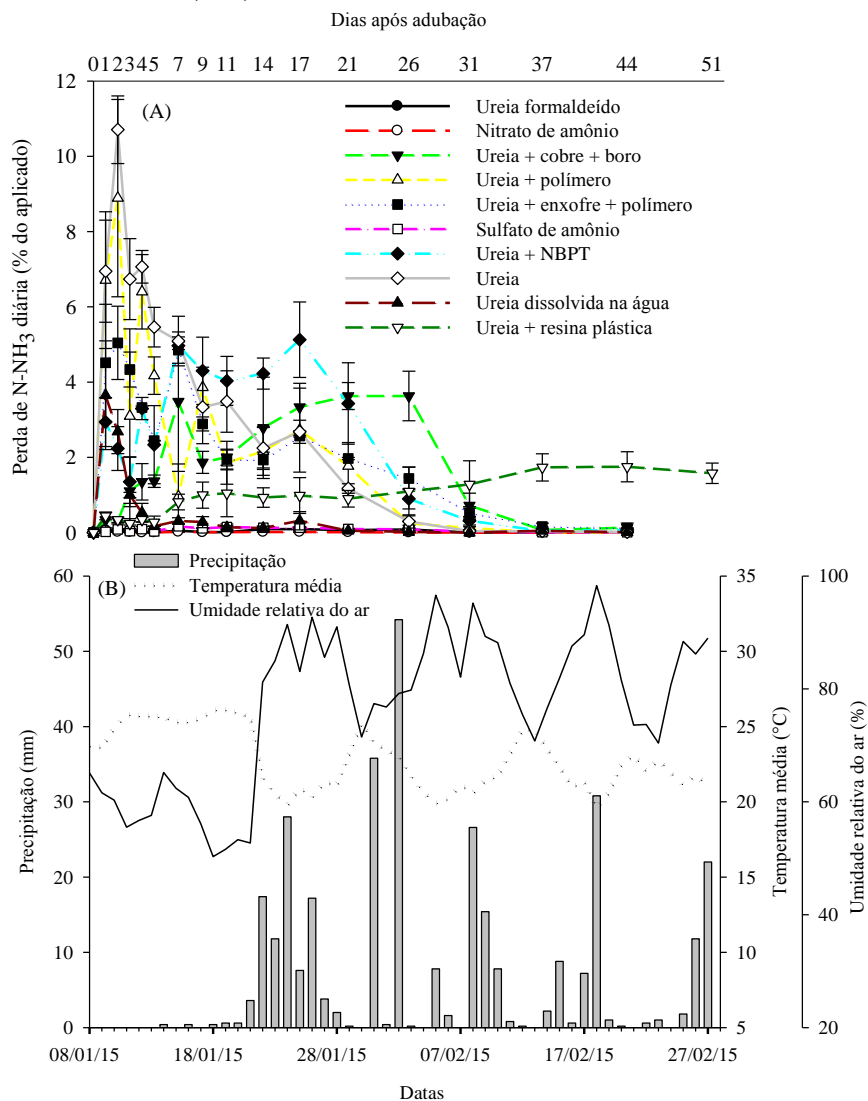
Foram observados pequenos picos de volatilização da ureia + cobre + boro aos 7 dias (4%) e aos 14 dias da ureia + cobre + boro (3%) e ureia + NBPT (2%). A ureia + resina plástica causou aumentos nas perdas de N-NH₃ por volatilização após os 22 dias da adubação. Após essa data, pela ação do sol, temperatura e umidade com a aplicação superficial do fertilizante ao solo, a película plástica apresentou maior degradação, expondo os grânulos de ureia ao ambiente e promovendo, assim, maiores perdas por volatilização.

As avaliações da primeira adubação foram realizadas até os 41 dias após a adubação pela ocorrência de volatilização de N-NH_3 de alguns fertilizantes até esse período.

Para os fertilizantes ureia + resina plástica, ureia dissolvida em água, ureia formaldeído, sulfato de amônio e nitrato de amônio foram observadas perdas de amônia por volatilização, em quantidades inferiores aos demais, mostrando-se eficientes tecnologias para minimização das perdas por volatilização. Quanto a esses resultados, observa-se, especialmente, que o fato da dissolução da ureia pura em água, para sua aplicação, promoveu reduções de 86% nas perdas de N por volatilização, quando comparado à ureia sem dissolução, podendo ser alternativa, altamente, eficiente na aplicação da ureia na cultura do cafeeiro

Na segunda adubação (08 jan. 2015), as condições climáticas desfavoráveis, com treze dias sem chuvas após a adubação além de altas temperaturas (médias de $25,3^\circ\text{C}$ nesse período), influenciaram altas perdas de amônia por volatilização dos fertilizantes avaliados (FIGURA 10A).

Figura 10 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na segunda adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016).

Para essa adubação as perdas acumuladas entre os tratamentos seguiu a seguinte ordem: ureia (55%) > ureia + polímero aniônico (43%) = ureia + NBPT

(38%) = ureia + enxofre + polímero (38%) > ureia + cobre + boro (27%) > ureia + resina plástica (15%) = ureia dissolvida em água (9%) > sulfato de amônio (1%) = ureia formaldeído (1%) = nitrato de amônio (0,2%).

O maior pico de volatilização constatado, nessa adubação, ocorreu, no segundo dia após aplicação dos fertilizantes, sendo a ureia e ureia + polímero aniônico as fontes que mais apresentaram perdas (11% e 9%, respectivamente). Dentro do período de treze dias de estiagem ocorridos, observou-se uma perda por parte da ureia de 50% do N aplicado pela volatilização de amônia (FIGURA 10A). Tasca et al. (2011), conduzindo experimento em laboratório, também, verificaram perdas de até 50%, em condições totalmente favoráveis à volatilização, como a aplicação em superfície sob altas temperaturas.

Seguido desses dois fertilizantes, observou-se, também, um pico de volatilização de amônia do fertilizante ureia + enxofre + polímero (5%), porém menor significativamente do que o pico observado para ureia e ureia + polímero aniônico.

Observou-se, também, que a ureia revestida com NBPT e a ureia revestida com cobre e boro promoveram atraso no pico de volatilização no período sem chuvas até o sexto dia após a aplicação dos fertilizantes (FIGURA 10A). No sétimo dia após a adubação, a ureia com NBPT apresentou pico de volatilização, com perda de 5% do aplicado e a ureia com cobre e boro 4%. Após essa data e mesmo com o retorno das chuvas, esses dois fertilizantes causaram perdas consideráveis, provavelmente, pela perda da ação dos elementos protetores da ureia contra a ação da urease. Os inibidores da urease podem se mostrar eficientes, para adubações em períodos sem chuva, porém os resultados apontaram um período máximo de proteção de seis dias para essas condições climáticas de adubação.

Existem, atualmente, no mercado, alguns compostos capazes de inibir a ação da urease do solo. Os mecanismos capazes de bloquear sua ação são,

basicamente, três: bloqueio do sítio ativo da enzima pela reação de íons como prata, mercúrio e cobre com grupos sulfidril da enzima; ação de compostos semelhantes à ureia, como as tio-ureias e metil-ureias que inativam o sítio ativo da urease e adição de moléculas que reagem com o níquel presente na urease, inativando-a (KRAJEWSKA; ZABORSKA; CHUDY, 2004).

Avaliando as perdas de $N-NH_3$ em ambiente controlado, Soares, Cantarella e Menegale (2012) relatam atraso e redução nos picos de volatilização de nitrogênio da ureia com NBPT variando de 7 a 9 dias. Outros autores, também, evidenciam atrasos e reduções nos picos de volatilização de N com uso de NBPT ou do cobre e boro (FARIA et al., 2014; NASCIMENTO et al., 2013). Segundo Cantarella (2007) e Pereira et al. (2009), precipitações ocorridas, em um período de 3 a 7 dias após a adubação, favorecem a atuação do NBPT como redutor da volatilização de amônia, fato que não ocorreu, neste estudo, onde se verificaram treze dias sem chuvas após adubação, o que comprometeu a ação do NBPT, do cobre e do boro no revestimento da ureia.

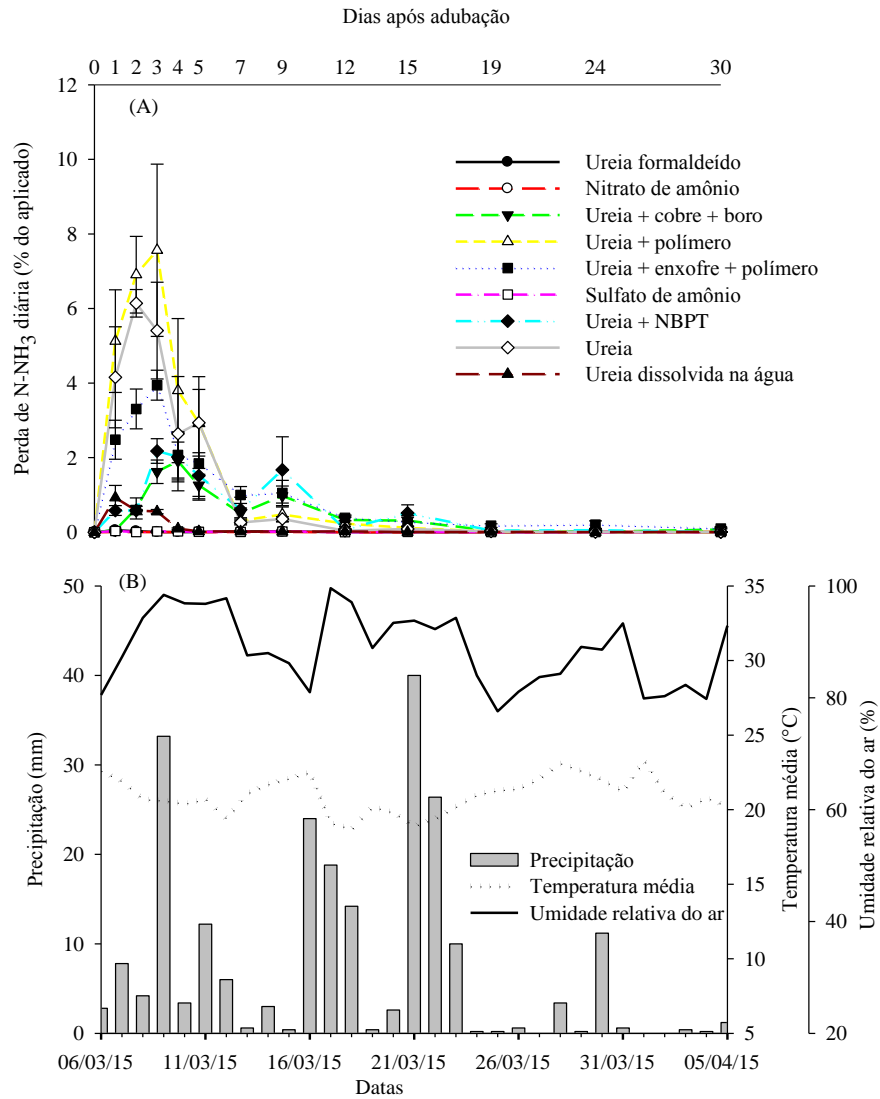
Após 7 dias da adubação, verificou-se que a ureia + resina plástica começou a apresentar pequenas perdas diárias de volatilização, próximas a 1%, aumentando para próximas de 2% após 37 dias da adubação (FIGURA 10A). Esse comportamento foi semelhante ao ocorrido, na primeira adubação, onde a volatilização de N desse fertilizante apresentou acentuação após alguns dias da adubação, influenciados pela degradação da película protetora dos grânulos de ureia.

Assim como na primeira adubação, nos fertilizantes nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído foram observadas as menores perdas por volatilização de amônia (< 2%). Já a ureia dissolvida em água e a ureia + resina plástica apresentaram maiores perdas acumuladas nessa adubação em relação à anterior.

Na terceira adubação, as quantidades de N-NH_3 volatilizada foram monitoradas, por um período de até trinta dias após a adubação, para todos os fertilizantes e, após os trinta dias, até os noventa e cinco dias após a adubação, foi avaliada a volatilização apenas do fertilizante ureia + resina plástica (FIGURAS 11 e 12), em razão das perdas expressivas, ainda, ocorrentes para esse fertilizante nesse período.

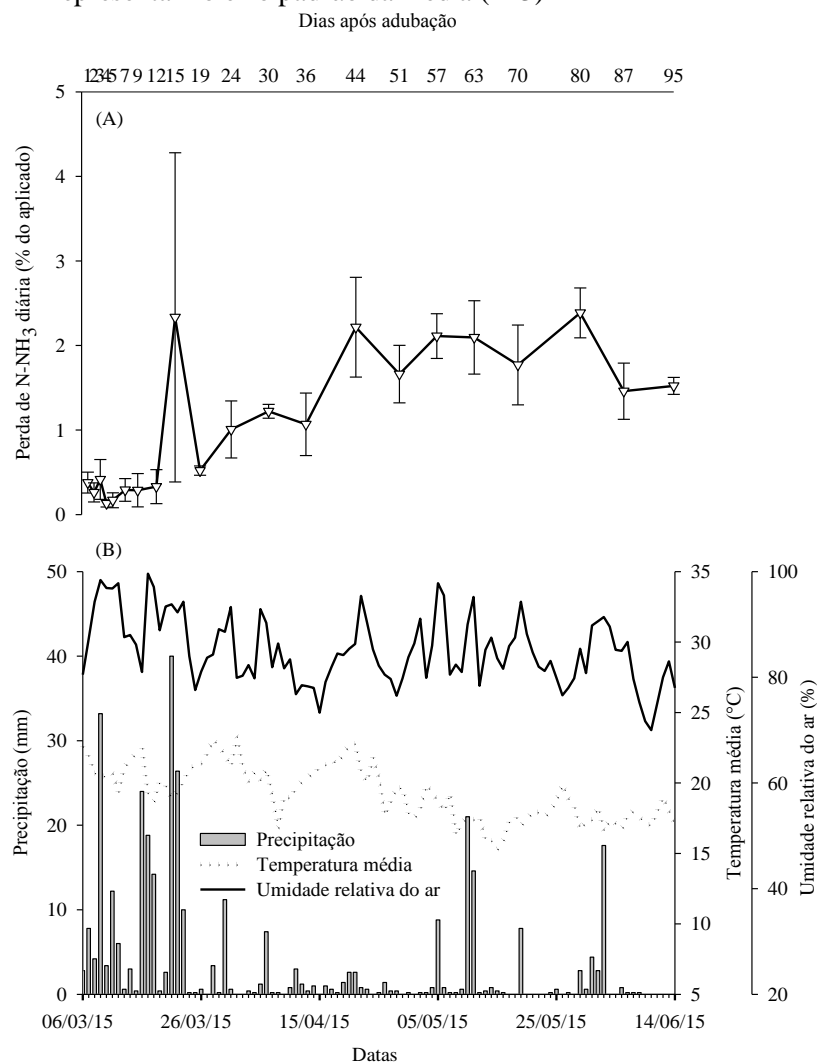
Após noventa e cinco dias da adubação, não foi mais possível fazer o monitoramento da volatilização pela “arruação” da lavoura como preparo para a colheita; prática que retira a quantidade restante de fertilizantes sob a planta, tornando-os indisponíveis após esse período.

Figura 11 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) e das condições climáticas na área (B) na terceira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016).

Figura 12 - Representação gráfica da volatilização diária de amônia (A) da ureia + resina plástica e das condições climáticas na área (B) na terceira adubação do ano 2014/2015. Obs.: As barras verticais (A) representam o erro padrão da média (n=3)



Fonte: Dados do autor (2016).

Nessa adubação, foram observadas as seguintes perdas acumuladas de amônia por volatilização: ureia + polímero aniônico (28 %) > ureia + resina plástica (26 %) = ureia (22 %) > ureia + enxofre + polímero (17 %) > ureia +

NBPT (10 %) = ureia + Cu + B (8 %) > ureia dissolvida (2 %) = ureia formaldeído (0,1 %) = sulfato de amônio (0,1 %) = nitrato de amônio (0,03%).

Diferente do que ocorreu, na segunda adubação, ocorreram chuvas em quantidades abundantes, após a terceira adubação, principalmente, nos sete primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes (70 mm), reduzindo, drasticamente, as perdas por volatilização (FIGURA 12B).

Assim como já observado, nas duas adubações anteriores, verificaram-se as maiores perdas pelos fertilizantes ureia + polímero aniônico e ureia (FIGURA 12A). As duas fontes apresentaram maior volatilização, ao terceiro dia após adubação, com um total de 8% e 5% de perdas pela ureia + polímero aniônico e ureia, respectivamente. Após o terceiro dia, essas duas fontes apresentaram quedas, nas quantidades volatilizadas, provavelmente, pela quantidade de chuvas, nesse dia (33 mm), que proporcionou a incorporação dos fertilizantes ao solo.

Seguida da ureia + polímero aniônico e ureia, observa-se tanto na terceira adubação quanto nas duas anteriores que a ureia + enxofre + polímeros apresenta a maior perda de N-NH₃ por volatilização. Essa fonte apresentou maiores perdas, também, ao terceiro dia da adubação (4%), porém foi capaz de reduzir as perdas em comparação com a ureia pura. Nesse caso, a ureia apresentou perda acumulada, ao final das avaliações, de 22% contra 17% da ureia + enxofre + polímero, médias diferentes, significativamente .

Algumas pesquisas já foram realizadas com a utilização do enxofre elementar como componente do recobrimento da ureia para minimização das perdas por volatilização de amônia (GIRARDI; MOURÃO FILHO, 2004). O enxofre promove acidificação gradual do solo, ao redor do grânulo, reduzindo, assim, a volatilização. Segundo Nascimento et al. (2013), a adição de enxofre elementar à ureia proporcionou uma redução de 50 % nas perdas de N quando comparada à ureia comum. Camadas de enxofre, também, podem formar uma

barreira, ao redor dos grânulos de ureia, impedindo seu contato com água e reduzindo as perdas por volatilização. Quando além do enxofre é adicionado polímero, para o recobrimento da ureia, acredita-se haver maior eficiência na redução das perdas.

Seguida da ureia + enxofre + polímeros, observaram-se maiores perdas pelas fontes ureia + NBPT e ureia + Cu + B, ambas com picos ao quarto dia da adubação (2 % em ambas).

Entre as fontes com menores perdas por volatilização, observa-se que a ureia dissolvida em água apresenta significativa redução quando comparada com ureia pura não dissolvida. Na média das três adubações, a dissolução da ureia em água proporcionou redução de 85 %, nas perdas de N por volatilização, em comparação com a aplicação da ureia pura em cobertura.

A incorporação da ureia ao solo, seja de forma mecânica ou via fertirrigação, a 5 cm de profundidade ou mais do solo, pode reduzir, de forma significativa, as perdas de N por volatilização (FENN; MIYAMOTO, 1981). Segundo Holcomb et al. (2011), a aplicação de ureia via fertirrigação utilizando-se uma lâmina de 15 mm (112 kg ha^{-1} de N), na região de Umatilla - Oregon, proporcionou reduções de 90 % nas perdas de N em comparação à aplicação da ureia pura.

Considerando as reduções significativas das perdas de N pela ureia, quando essa é dissolvida em água, acredita-se que essa técnica seja de grande importância, para os produtores de café, nas práticas de adubação nitrogenada com utilização da ureia, principalmente, onde seja possível a implementação da fertirrigação.

A utilização da resina plástica, proteção adicionada à ureia em um dos fertilizantes utilizados, possibilitou registros de volatilização de N-NH_3 por um período prolongado (FIGURA 13). Esse fato ocorreu, provavelmente, pela lenta liberação do N do fertilizante, que ocorre com a gradual degradação da resina

que o recobre, o que proporcionou, porém, um acumulado de perdas bastante expressivo na terceira adubação (23 %). Ou seja, embora esteja ocorrendo a liberação gradual do N, para as plantas por um período longo, grande parte deste está sendo perdido por volatilização prejudicando o aproveitamento eficaz pelas plantas. Observou-se, para esse fertilizante, um pico de volatilização, aos 15 dias após a adubação (2 %), ocorrido após uma chuva de 40 mm, sendo o maior registro de precipitação para essa adubação.

Com a ureia formaldeído, foram observadas, nas três adubações, perdas menores que 1 % de N por volatilização. Segundo os resultados obtidos, neste estudo, está havendo liberação gradual do N desse fertilizante e não está sendo perdido por volatilização, contribuindo para a eficiência da adubação.

As médias de volatilização acumulada, em cada uma das três adubações, para cada fertilizante, podem ser observadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização nas três adubações do segundo ano de avaliação do experimento (% do aplicado).

Fertilizante	Adubação			Média
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Ureia	31,8 b	55,3 a	22,1 b	38,4 a
Ureia + polímeros aniônicos	38,1 a	43,0 b	27,6 a	40,9 a
Ureia + S ⁰ + polímeros	26,5 c	38,0 b	16,8 c	28,8 b
Ureia + Cu + B	15,5 d	27,0 c	7,7 d	17,1 c
Ureia dissolvida	4,6 e	9,3 d	2,2 e	5,3 d
Ureia + NBPT	22,6 c	38,2 b	9,8 d	26,0 b
Ureia formaldeído	0,7 e	0,6 e	0,1 e	0,6 d
Sulfato de amônio	0,5 e	1,2 e	0,1 e	0,6 d
Ureia + resina	5,7 e	14,7 d	23,6 b	14,5 c
Nitrato de amônio	0,3 e	0,2 e	0,03 e	0,2 d
Média	14,6	22,8	11,0	17,2
Coeficiente de Variação (%)	23,0	20,1	22,0	16,6

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Os fertilizantes nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído apresentaram, em todas as adubações, as menores perdas de N por volatilização. As baixas perdas de N dos fertilizantes sulfato de amônio e nitrato de amônio, que possuem reação ácida no solo, também, foram obtidas em outros estudos (FARIA et al., 2014; FONTOURA; BAYER, 2010; LARA CABEZAS; SOUZA, 2008; NASCIMENTO et al., 2013; VIERO et al., 2014).

Pelos valores acumulados de volatilização (TABELA 10), podem ser destacados as maiores perdas ocorridas entre a maioria dos fertilizantes na segunda adubação. Durante esse período, ocorreu uma condição climática desfavorável à adubação assim como a ocorrida na terceira adubação do primeiro ano. A falta de chuvas e as altas temperaturas, nesse momento, acentuaram as perdas, principalmente, por parte da ureia que chegou a apresentar perdas de mais de 50% do total aplicado.

Observa-se, também, que os valores de volatilização da ureia + NBPT foram mais acentuados no segundo ano de adubação do que no primeiro. Esse fato pode estar ligado às questões climáticas diferenciadas, nesse ano, já citadas, como chuvas e temperaturas, que reduziram o efeito do NBPT, ou até mesmo por problemas industriais, na produção do fertilizante, como diferenças nas doses de NBPT adicionados à ureia, já que se tratava de outro lote de fertilizantes.

Pelos dados de perdas acumuladas da Tabela 10, pode ser verificado, também, no fertilizante ureia + resina plástica, um aumento da volatilização da primeira adubação até a terceira. Esse fato pode estar ligado à estrutura da película protetora que se degrada lentamente. Dessa forma, pode ter havido resíduo acumulado de grânulos da primeira adubação que vieram a apresentar volatilização somente na terceira adubação ou, posteriormente, sugerindo uma revisão do parcelamento da adubação quando da utilização desse fertilizante.

O pH do solo é um dos atributos químicos que mais influenciam nas reações que ocasionam a volatilização (TASCA et al., 2011). Durante a hidrólise da ureia, com ação da urease e da água, ocorre consumo de prótons H^+ do local da reação, gerando a elevação do pH ao redor dos grânulos do fertilizante, acentuando a volatilização.

Durante a condução do experimento, foram monitorados os valores de pH do solo, na camada de 0 a 5 cm na região da adubação, para avaliar possíveis influências do pH do solo na volatilização (TABELA 11).

Tabela 11 - Variações no pH do solo (0-5cm) durante a condução do experimento.

Fertilizante	Adubação			
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	Após a 3 ^a
Ureia	5,6 a	6,4 a	6,5 Aa	6,4 a
Nitrato de amônio	5,4 a	5,2 a	4,6 Ba	4,7 a
Sulfato de amônio	5,3 a	5,2 a	4,9 Ba	5,0 a
Ureia dissolvida	6,3 a	6,8 a	6,1 Aa	5,8 a
Ureia + NBPT	5,5 a	6,2 a	5,9 Aa	5,2 b
Ureia + Cu + B	6,0 a	6,4 a	5,4 Aa	5,6 a
Ureia + polímero aniônico	5,6 a	6,1 a	6,2 Aa	6,0 a
Ureia + S + polímeros	5,4 a	5,7 a	5,4 Ba	5,8 a
Ureia + resina	5,6 a	5,8 a	5,1 Ba	6,0 a
Ureia formaldeído	5,1 a	5,6 a	4,7 Ba	4,7 a
Média	5,58b	5,92a	5,57b	5,51b
Coeficiente de variação (%)	7,54	7,11	7,56	7,63

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

Diferentemente do ocorrido, no primeiro ano de avaliações, não ocorreram diferenças de pH entre as épocas avaliadas, à exceção da ureia + NBPT que apresentou redução na última avaliação. Entre os fertilizantes, de

forma isolada entre as avaliações, diferenças foram observadas apenas na terceira avaliação onde a ureia formaldeído, sulfato de amônio, nitrato de amônio, ureia + S + polímeros e ureia + resina apresentaram os menores valores.

Também foram monitorados os teores de nitrogênio, nas folhas das plantas, para avaliar possíveis influências das maiores perdas de N na nutrição da planta (TABELA 12).

Tabela 12 - Variações nos teores foliares de nitrogênio (g kg^{-1}) durante a condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia	29,7 a	27,6 a	31,4 a	26,6 a	28,8 B
Nitrato de amônio	29,8 a	29,0 a	30,4 a	29,8 a	29,8 B
Sulfato de amônio	29,0 b	35,7 a	35,9 a	29,5 b	32,5 A
Ureia dissolvida	30,6 a	32,1 a	33,1 a	29,1 a	31,2 A
Ureia + NBPT	29,9 a	31,5 a	26,0 a	30,3 a	29,4 B
Ureia + Cu + B	29,2 a	29,9 a	31,1 a	30,9 a	30,3 B
Ureia + polímero aniônico	31,1 a	33,2 a	32,8 a	27,5 a	31,2 A
Ureia + S ⁰ + polímeros	31,7 a	33,2 a	32,5 a	30,0 a	31,8 A
Ureia + resina	26,9 a	32,1 a	27,2 a	30,3 a	29,1 B
Ureia formaldeído	28,5 a	29,1 a	28,9 a	30,1 a	29,1 B
Média	29,6 a	31,3 a	30,9 a	29,4 a	
Faixas críticas ⁽¹⁾	28 a 32	28 a 31	26 a 31	28 a 31	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares recomendadas por Malavolta (1992).

Para a maioria dos teores médios de nitrogênio foliares observados para esse ano do experimento, observa-se que estão dentro dos padrões considerados adequados ao cafeeiro em produção, nas respectivas épocas amostradas, segundo as recomendações de Malavolta (1992). Alguns tratamentos, em algumas épocas

avaliadas, a exemplo da ureia antes da segunda adubação e após a terceira adubação e a ureia + polímero aniônico após a terceira adubação, apresentaram teores abaixo dos níveis críticos. Assim como observado, para o primeiro ano do experimento, não houve grandes variações nos teores de N entre os tratamentos e entre as épocas avaliadas, mesmo havendo grande quantidade de perdas do nutriente por volatilização em alguns fertilizantes.

Assim como suposto para o primeiro ano, acredita-se que a quantidade de N aplicada (450 kg ha^{-1}) esteja suprimindo as quantidades requeridas pelo cafeeiro mesmo com as perdas ocorrentes ou outras fontes de N, como a matéria orgânica do solo, podem estar, também, contribuindo com a nutrição por N.

Na avaliação dos teores foliares de enxofre no segundo ano, estes acima das faixas críticas recomendadas para o cafeeiro em cada época analisada, constatou-se que, entre as fontes, o sulfato de amônio se destacou entre os demais, apresentando maiores teores do nutriente, na avaliação de sessenta dias após a última adubação e no teor médio ao final de todas as avaliações (TABELA 13). O fertilizante sulfato de amônio contém cerca de 20% de enxofre em sua composição, quantidade que não é observada, nos demais fertilizantes, fato que contribuiu para o aumento do teor foliar, desse nutriente, nas folhas das plantas. Houve diferenças nos teores entre as épocas avaliadas, conforme observado para os outros nutrientes, inclusive, no primeiro ano.

Tabela 13 - Variações nos teores foliares de enxofre (g kg^{-1}) durante a condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia	11,7 a	10,6 b	11,6 Aa	9,4 Cb	10,8 B
Nitrato de amônio	11,1 a	9,2 b	11,5 Aa	9,4 Cb	10,3 C
Sulfato de amônio	12,2 a	11,9 a	12,7 Aa	13,5 Aa	12,6 A
Ureia dissolvida	10,5 a	11,4 a	11,5 Aa	9,8 Ca	10,8 B
Ureia + NBPT	10,8 a	10,2 a	10,1 Ba	8,9 Ca	10,0 C
Ureia + Cu + B	12,5 a	9,9 b	8,7 Bb	9,0 Cb	10,0 C
Ureia + polímero aniônico	12,0 a	10,7 a	11,8 Aa	10,7 Ca	11,2 B
Ureia + S ⁰ + polímeros	12,4 a	10,2 b	10,7 Ab	10,4 Cb	10,9 B
Ureia + resina	11,0 a	11,3 a	10,8 Aa	8,2 Cb	10,3 C
Ureia formaldeído	11,7 a	11,2 a	10,8 Aa	11,5 Ba	11,3 B
Média	11,6	10,6	11,0	10,1	
Faixas críticas ⁽¹⁾	1,6 a 2,3	1,8 a 2,3	2,1 a 2,4	1,8 a 2,1	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares recomendadas por Malavolta (1992).

Para os teores foliares de cobre, não foram observadas diferenças entre o fertilizante, contendo cobre em sua composição, no caso a ureia + Cu + B, em relação aos demais fertilizantes, havendo apenas diferenças nos teores quanto às épocas avaliadas (TABELA 14). Os teores observados estão dentro das faixas críticas recomendadas ao cafeeiro para cada época.

Tabela 14 - Variações nos teores foliares de cobre (mg kg^{-1}) durante a condução do experimento.

Fertilizante	Adubação				Média
	Antes da 1ª	Antes da 2ª	Antes da 3ª	Após a 3ª	
Ureia	10,6 b	29,2 Aa	11,7 Bb	13,3 b	16,2
Nitrato de amônio	8,4 a	19,3 Ba	14,9 Ba	13,1 a	13,9
Sulfato de amônio	8,4 c	29,8 Aa	16,1 Bb	15,5 b	17,2
Ureia dissolvida	10,2 a	19,5 Ba	14,4 Ba	16,0 a	15,1
Ureia + NBPT	7,4 b	17,8 Ba	20,5 Aa	14,0 a	14,9
Ureia + Cu + B	13,2 a	19,8 Ba	14,7 Ba	11,2 a	14,7
Ureia + polímero aniônico	9,8 b	20,2 Ba	15,0 Ba	15,5 a	15,1
Ureia + S ⁰ + polímeros	9,6 a	17,8 Ba	15,4 Ba	15,2 a	14,5
Ureia + resina	5,4 b	19,5 Ba	21,9 Aa	14,8 a	15,4
Ureia formaldeído	6,2 c	14,1 Bb	26,5 Aa	16,2 b	15,8
Média	8,9 c	20,6 a	17,1 b	14,5 b	
Faixas críticas ⁽¹⁾	10 - 20				

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ⁽¹⁾ Faixas críticas dos teores foliares recomendadas por Malavolta (1992).

Ao final do segundo ano de avaliações, podemos concluir, na média do biênio avaliado (6 adubações), que os fertilizantes ureia convencional e ureia revestida com polímeros aniônicos tiveram as maiores perdas de N por volatilização de amônia (TABELA 15). Dentre os que apresentaram menores perdas, nesse período, podemos observar o nitrato de amônio, sulfato de amônio e ureia formaldeído.

Tabela 15 - Valores médios de volatilização (% do aplicado - 6 adubações) dos fertilizantes avaliados.

Fertilizante	Primeiro ano (2014/2015)			Segundo ano (2015/2016)			Média
	Adubação			Adubação			
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	1 ^a	2 ^a	3 ^a	
Ureia	28,6 a	22,2 b	43,2 a	31,8 b	55,3 a	22,1 b	33,9 a
Ureia + polímeros aniônicos	32,6 a	30,2 a	44,7 a	38,1 a	43,0 b	27,6 a	36,0 a
Ureia + S ⁰ + polímeros	29,6 a	23,5 b	39,8 a	26,5 c	38,0 b	16,8 c	29,0 b
Ureia + Cu + B	25,4 a	17,1 c	34,3 b	15,5 d	27,0 c	7,7 d	21,2 c
Ureia dissolvida	8,8 b	2,3 d	2,5 e	4,6 e	9,3 d	2,2 e	5,0 f
Ureia + NBPT	3,3 c	2,9 d	29,5 c	22,6 c	38,2 b	9,8 d	17,7 d
Ureia formaldeído	2,1 c	0,6 e	0,6 e	0,7 e	0,6 e	0,1 e	0,8 g
Sulfato de amônio	1,5 c	0,5 e	0,7 e	0,5 e	1,2 e	0,1 e	0,8 g
Ureia + resina	1,4 c	3,7 d	20,5 d	5,7 e	14,7 d	23,6 b	11,6 e
Nitrato de amônio	0,7 c	0,1 e	0,1 e	0,3 e	0,2 e	0,03 e	0,2 g

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letra nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância.

4.3 Produtividade

A produtividade dos tratamentos sofreu grande influência de fatores climáticos ocorridos durante os anos de avaliação (TABELA 16).

Tabela 16 - Produtividade (sacas 60 kg ha⁻¹) obtida nos tratamentos

Fertilizante	Safras			Média 15-16
	2014 (Base)	2015	2016	
Ureia	41	15 Bb	30 Aa	23
Sulfato de amônio	51	24 Aa	27 Aa	25
Nitrato de amônio	42	11 Bb	39 Aa	24
Ureia dissolvida	43	22 Aa	22 Ba	22
Ureia + NBPT	42	20 Aa	21 Ba	20
Ureia + Cu + B	34	9 Ba	20 Ba	14
Ureia + polímeros aniônicos	50	24 Aa	29 Aa	26
Ureia + S + polímeros	45	24 Aa	14 Ba	19
Ureia + resina	44	25 Aa	25 Ba	25
Ureia formaldeído	41	23 Aa	17 Ba	20
Média	43	20 a	24 b	
Precipitação total (mm) ¹	953,8	1086,6	1372,2	
Temperaturas médias (°C) ¹	20,5	20,2	20,8	

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem significativamente entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de significância. ¹ Foram somadas as precipitações e calculado o valor médio de temperaturas referentes ao ano agrícola correspondente, ou seja, de 01/08 do ano anterior a 31/07 do referido ano.

Observa-se que as reduções, nos volumes de chuva, ocorridas nos anos de 2014 e 2015, em comparação ao ano de 2016, este mais próximo à média histórica da região de 1460 mm anuais (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007), refletiu em quedas acentuadas de produtividade dos anos de 2015 e 2016. Além dos volumes de chuvas reduzidos, observou-se, durante esses anos, uma desigualdade da sua distribuição, com períodos de veranicos de até 28 dias, nos meses de janeiro de 2014 e 2015, acompanhados de altas temperaturas, que contribuíram para o aumento do estresse na lavoura e consequente redução na produtividade.

Somado aos fatores climáticos e a ela relacionados, a lavoura sofreu um surto de ferrugem tardia pelo atraso no ciclo da doença, nesses anos, vindo a apresentar altos índices de infecção, no momento da colheita, período em que se torna inviável o controle imediato em razão do período de carência dos fungicidas curativos. Dessa forma, houve atraso no controle da doença levando a um depalperamento excessivo da lavoura.

A safra colhida, no ano de 2014, não sofreu interferência dos tratamentos, pois foram implementados, no mês de novembro de 2013, período em que já haviam se formado os frutos colhidos nessa safra, servindo esses números apenas para comparação da evolução da produtividade da lavoura. Observa-se, pelas médias obtidas nesse ano, uma grande uniformidade de produtividade entre as parcelas, evidenciando a uniformização entre as plantas no início dos tratamentos. Assim foram analisados, neste trabalho, somente as produtividades obtidas nos anos de 2015 e 2016.

Na safra de 2015, foram observadas menores produtividades com a utilização dos fertilizantes ureia, nitrato de amônio e ureia + Cu + B. No entanto observou-se a recuperação, na produtividade desses três fertilizantes, para o ano de 2016, evidenciando aí a bienalidade de produção comum da cultura.

Na safra colhida em 2016, observou-se produtividade menor (estatisticamente inferior) nos tratamentos ureia dissolvida, ureia + Cu + B, ureia + S + polímeros, ureia + resina, ureia + NBPT e ureia formaldeído. Porém, na média dos anos 2015 e 2016, não foram observadas diferenças significativas ($p \leq 0,05$), na produtividade entre os tratamentos, provavelmente, pela bienalidade de produção entre os tratamentos.

A ausência de diferenças, na produtividade entre tratamentos com baixas a altas perdas de N por volatilização, é reflexo dos teores foliares de N que se mantiveram em níveis adequados ao cafeeiro nos dois anos avaliados. Ou seja, embora haja perdas por volatilização, as plantas se mantêm bem nutridas com nitrogênio e não apresentam diferenças quanto à produtividade. Esse fato se deu, provavelmente, pela dose de N aplicada que foi capaz de suprir, mesmo com as perdas, as necessidades por nitrogênio pela cultura, além de fontes extras do nutriente como a matéria orgânica do solo.

Segundo Fernandes e Fraga Júnior (2010), em experimento com o cafeeiro irrigado, maiores produtividades foram obtidas com uso de ureia

polimerizada (Kimcoat[®]), na dose de 300 kg ha⁻¹ de N, em comparação à ureia comum e ao nitrato de amônio na mesma dose. Os autores atribuem às menores perdas de N por volatilização ocorridas com uso desse produto como preponderante, para as maiores produtividades, já que houve maior disponibilidade do nutriente às plantas. Já Lima et al. (2016), avaliando, também, o uso de ureia polimerizada, nitrato de amônio e ureia comum na adubação do cafeeiro, este em condição de sequeiro e irrigado, concluiu que, na média de quatro safras, não houve diferenças significativas entre as produtividades dos tratamentos, tanto no cultivo irrigado, adubado via fertirrigação quanto no cultivo de sequeiro.

Em trabalho de Fernandes, Santinato e Silva (2010), na comparação entre a utilização de sulfato de amônio, formulados contendo nitrogênio e ureia formaldeído, não se observaram diferenças entre as produtividades na primeira safra com uso das diferentes fontes. Segundo Paiva et al. (2011), a aplicação de ureia + enxofre + polímeros possibilitou maior produtividade do cafeeiro em comparação ao uso de formulado com nitrogênio na análise de duas safras de forma distinta, porém, na média do biênio, não foram obtidas diferenças significativas entre os tratamentos.

Ainda são divergentes os resultados obtidos quanto à produtividade do cafeeiro adubado com diferentes fontes de nitrogênio. As diferenças são decorrentes das condições de condução em cada experimento, citando-se como as mais pronunciadas as características diferenciadas de solo (químicas e físicas) e condições climáticas (chuvas e temperaturas) a que são submetidas. Além disso, pela característica bienal de produtividade do cafeeiro e pela sua perenidade, são necessários dados de várias safras, para que se obtenham dados médios mais seguros, que representem, de fato, as respostas aos fertilizantes.

Apesar das ausências de diferenças significativas entre as produtividades, observa-se que alguns fertilizantes apresentam maior

produtividade por ponto de N, efetivamente, utilizado pelas plantas, ou seja, após descontadas as perdas por volatilização (TABELA 17).

Tabela 17 - Relação entre a produtividade dos tratamentos (kg) e a quantidade de N (kg) efetivamente utilizada.

Fertilizante	Kg café produzido / Kg de N utilizado
Ureia + polímeros aniônicos	6,2 a
Ureia	6,2 a
Nitrato de amônio	5,2 a
Sulfato de amônio	3,6 b
Ureia + NBPT	3,4 b
Ureia + Cu + B	3,4 b
Ureia dissolvida	3,1 b
Ureia + resina plástica	2,5 b
Ureia formaldeído	2,3 b
Ureia + S + polímero	1,4 b

Fonte: Dados do autor (2016)

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

Observa-se, nesse caso, que os fertilizantes ureia + polímeros aniônicos e ureia que apresentaram altas perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e o fertilizante nitrato de amônio, com baixas perdas, apresentaram as maiores quantidades de café produzidas por quilo de N aplicado efetivamente (considerando as perdas). Seguido desses tratamentos, todos os demais fertilizantes produziram, estatisticamente, a mesma quantidade de café por quilo de nitrogênio, considerando as perdas provocadas por volatilização da amônia.

4.4 Custo de produção

Nas Tabelas 18 a 28 estão descritos os detalhes do levantamento dos custos de formação, condução de 6 a 18 meses e produção de 1 hectare da lavoura utilizada no experimento, levando-se em consideração os diferentes fertilizantes nitrogenados utilizados na fase de produção da lavoura.

Na tabela 18, estão detalhados os custos com operações, dentre elas manuais e mecanizadas, empregados no processo de implantação da cultura.

Tabela 18 - Custos com operações (manuais e mecanizadas) para implantação da lavoura.

Custos de implantação				
Operações (manuais e mecanizadas)				
Item	Unid. ⁽¹⁾	Quant.	Valor unitário	Valor total
Limpeza da área com trator	HM	3	R\$ 70,00	R\$ 210,00
Aplicação de calcário	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Aração + Gradagem	HM	3	R\$ 70,00	R\$ 210,00
Preparo do sulco	HM	3	R\$ 70,00	R\$ 210,00
Calagem no sulco	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Fosfatagem no sulco	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Aplicação de Herbicida	HM	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
Subsolagem do sulco	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Plantio (manual)	DH	10	R\$ 65,00	R\$ 650,00
Plantio (horas de trator)	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Adubação de cobertura	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Pulverização (manual)	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Capinas (2)	DH	10	R\$ 65,00	R\$ 650,00
Combate a formigas	DH	0,25	R\$ 65,00	R\$ 16,25
			Subtotal 1	R\$ 2.846,25

Fonte: Dados do autor (2016)

⁽¹⁾ HM = Hora máquina, DH = Dia homem.

A Tabela 19 descreve os custos com insumos gastos para a implantação da lavoura do experimento.

Tabela 19 - Custos com insumos para a implantação da lavoura.

Custos de implantação				
Gastos com insumos				
Item	Unid.	Quant.	Valor unitário	Valor total
Calcário	ton.	3	R\$ 108,89	R\$ 326,67
Superfosfato simples	ton.	1	R\$ 915,22	R\$ 915,22
Adubo 25-00-25	ton.	0,4	R\$ 1.546,11	R\$ 618,44
Micronutrientes	kg	1	R\$ 5,72	R\$ 5,72
Herbicidas pós-emergente	L	3	R\$ 58,62	R\$ 175,86
Herbicidas pré-emergente	L	1	R\$ 9,86	R\$ 19,86
Inseticidas (formicidas)	kg	1	R\$ 11,44	R\$ 11,44
Fungicidas	L	0,1	R\$ 73,43	R\$ 7,34
Mudas (plantio + replantio)	Mud a	4000	R\$ 0,37	R\$ 1.480,00
			Subtotal 2	R\$ 3.560,56
			Subtotais 1 + 2	R\$ 6.406,81

Fonte: Dados do autor (2016)

Na Tabela 20 estão detalhados todos os custos com operações manuais e mecanizadas utilizadas para a condução da lavoura no período de 6 até 18 meses de idade, considerada como fase de formação do talhão.

Tabela 20 - Custos com operações (manuais e mecanizadas) para condução de 6 a 18 meses da lavoura

Custos de condução de 6 a 18 meses				
Operações (manuais e mecanizadas)				
Item	Unid.	Quant.	Valor unitário	Valor total
Capina manual (2) ⁽¹⁾	DH	10	R\$ 65,00	R\$ 650,00
Herbicida pré-emergente	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Herbicida pós-emergente	HM	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
Capina com trator	HM	3	R\$ 70,00	R\$ 210,00
Aplicação foliar	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Desbrotas	DH	2	R\$ 65,00	R\$ 130,00
Replantios	HM	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
Replantios	DH	3	R\$ 65,00	R\$ 195,00
Combate a formigas	DH	0,25	R\$ 65,00	R\$ 16,25
			Subtotal 1	R\$ 1.471,25

Fonte: Dados do autor (2016)

⁽¹⁾Número de operações em um ano

A Tabela 21 detalha os custos com insumos empregados para o período de formação da lavoura, que envolveu de 6 aos 18 meses.

Tabela 21 - Custos com insumos para condução da lavoura de 6 a 18 meses.

Custos de condução de 6 a 18 meses				
Gastos com insumos				
Adubo 25-00-25	ton.	0,5	R\$ 1.546,11	R\$ 773,06
Micronutrientes	kg	2	R\$ 5,72	R\$ 11,44
Herbicidas pré-emergentes	L	1	R\$ 58,62	R\$ 58,62
Herbicidas pós-emergentes	L	3	R\$ 19,86	R\$ 59,58
Inseticidas	L	0,3	R\$ 72,11	R\$ 21,63
Fungicidas	L	0,3	R\$ 73,43	R\$ 22,03
Formicidas	kg	1	R\$ 11,44	R\$ 11,44
Mudas para replantio	Muda	200,00	R\$ 0,37	R\$ 74,00
			Subtotal 2	R\$ 1.031,80
			Subtotais 1 + 2	R\$ 2.503,10

Fonte: Dados do autor (2016)

A Tabela 22 mostra de forma resumida todos os custos com implantação e condução de 6 a 18 meses do experimento, além do acréscimo de 5% que contempla demais custos operacionais. Essa parcela do custo será posteriormente empregada como custos com depreciação da lavoura, considerando uma vida útil média de 15 anos para a mesma.

Tabela 22 - Resumo dos custos para implantação, condução de 6 a 18 meses e depreciação da lavoura

Fase	Custo
Implantação	R\$ 6.406,81
Condução 6 a 18 meses	R\$ 2.503,10
Total	R\$ 8.909,91
Outras despesas operacionais (5%)	R\$ 445,50
Investimento total de formação da lavoura	R\$ 9.355,41
Depreciação anual (15 anos de vida útil)	R\$ 623,69

Fonte: Dados do autor (2016)

As Tabelas 23, 24, 25 e 26 descrevem todos os custos com mão de obra, máquinas e insumos, inclusive, os fertilizantes nitrogenados adotados como tratamentos do experimento, empregados para a produção da lavoura em um ano, em área de um hectare.

Tabela 23 - Custos com operações (manuais e mecanizadas) para produção de 1 ha de café.

Custos para produção				
Operações (manuais e mecanizadas)				
Item	Unid.	Quant	Valor unitário	Valor total
Calcário	HM	1,5	R\$ 70,00	R\$ 105,00
Palha de café (esparramação)	HM	4	R\$ 70,00	R\$ 280,00
Palha de café (esparramação)	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Desbrotas	DH	1	R\$ 65,00	R\$ 65,00
Adubações (3) ⁽¹⁾	HM	9	R\$ 70,00	R\$ 630,00
Arruação	DH	6	R\$ 65,00	R\$ 390,00
Capinas (1)	DH	4	R\$ 65,00	R\$ 260,00
Herbicidas (1)	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Foliar (4)	HM	8	R\$ 70,00	R\$ 560,00
Esparramação de leiras	HM	2	R\$ 70,00	R\$ 140,00
Combate a formigas (2)	DH	0,5	R\$ 65,00	R\$ 32,50
Capina tratorizada (2)	HM	4	R\$ 70,00	R\$ 280,00
			Subtotal 1	R\$ 2.947,50

Fonte: Dados do autor (2016)

⁽¹⁾Número de operações em um anoTabela 24 - Custos para colheita e processos pós-colheita do café⁽¹⁾

Custos com colheita e pós-colheita				
Item	Unid.	Quant.	Valor unitário	Valor total
Colheita	Medidas 60L	180	R\$ 10,00	R\$ 1.800,00
Secagem	DH	15	R\$ 65,00	R\$ 975,00
Limpeza	Saca beneficiada	20	R\$ 15,00	R\$ 300,00
Sacaria de Juta	Saco	20	R\$ 4,50	R\$ 90,00
Transportes	HM	3	R\$ 70,00	R\$ 210,00
			Subtotal 2	R\$ 3.375,00

Fonte: Dados do autor (2016)

⁽¹⁾Produtividade média obtida = 20 sacas ha⁻¹

Tabela 25 - Custos com insumos para produção de 1 ha de café

Custos para colheita				
Gastos com insumos				
Item	Unid.	Quant.	Valor unitário	Valor total
Calcário	ton.	2	R\$ 108,89	R\$ 217,78
Cloreto de Potássio	ton.	0,5	R\$ 1.587,11	R\$ 793,56
Superfosfato Simples	ton.	0,5	R\$ 915,22	R\$ 457,61
Micronutrientes	kg	4	R\$ 5,72	R\$ 22,88
Herbicida	L	3	R\$ 19,86	R\$ 59,58
Espalhante adesivo	L	0,06	R\$ 11,21	R\$ 0,67
Fungicida	L	3	R\$ 73,43	R\$ 220,29
Formicida	kg	2	R\$ 11,44	R\$ 22,88
Subtotal 3				R\$ 1.795,25
Subtotais 1 + 2 + 3:				R\$ 8.117,75

Fonte: Dados do autor (2016)

Tabela 26 - Custos com fertilizantes nitrogenados para produção de 1 ha de café.

Gastos com fertilizantes nitrogenados				
Tratamentos	Unid.	Quant.	Preço por ton.	Custo por hectare
Ureia	ton.	1,00	R\$ 1.714,44	R\$ 1.714,44
Sulfato de amônio	ton.	2,37	R\$ 1.131,67	R\$ 2.680,27
Nitrato de amônio	ton.	1,45	R\$ 1.224,33	R\$ 1.777,25
Ureia + Cu + B	ton.	1,01	R\$ 1.570,00	R\$ 1.587,64
Ureia + polímero aniônico	ton.	1,05	R\$ 1.704,56	R\$ 1.783,84
Ureia + S + polímeros	ton.	1,15	R\$ 3.259,78	R\$ 3.761,28
Ureia + resina	ton.	1,02	R\$ 9.000,00	R\$ 9.204,55
Ureia + NBPT	ton.	1,00	R\$ 1.678,89	R\$ 1.678,89
Ureia formaldeído	ton.	1,73	R\$ 3.110,00	R\$ 5.382,69
Ureia dissolvida	ton.	1,00	R\$ 1.714,44	R\$ 1.714,44

Fonte: Dados do autor (2016)

A Tabela 27 resume os custos operacionais efetivos (COE) empregados na condução da lavoura considerando-se a utilização de cada um dos fertilizantes nitrogenados adotados no trabalho.

Tabela 27 - Custo operacional efetivo para fase de produção do café.

Tratamentos	Insumos, mão de obra e maquinário	Outras despesas operacionais (5%)	COE
Ureia	R\$ 9.832,19	R\$ 491,61	R\$ 10.323,80
Sulfato de amônio	R\$ 10.798,02	R\$ 539,90	R\$ 11.337,92
Nitrato de amônio	R\$ 9.895,00	R\$ 494,75	R\$ 10.389,75
Ureia + Cu + B	R\$ 9.705,39	R\$ 485,27	R\$ 10.190,66
Ureia + polímero aniônico	R\$ 9.901,59	R\$ 495,08	R\$ 10.396,67
Ureia + S + polímeros	R\$ 11.879,03	R\$ 593,95	R\$ 12.472,98
Ureia + resina	R\$ 17.322,29	R\$ 866,11	R\$ 18.188,41
Ureia + NBPT	R\$ 9.796,64	R\$ 489,83	R\$ 10.286,47
Ureia formaldeído	R\$ 13.500,44	R\$ 675,02	R\$ 14.175,46
Ureia dissolvida	R\$ 9.832,19	R\$ 491,61	R\$ 10.323,80

Fonte: Dados do autor (2016)

A Tabela 28 descreve o COE de cada tratamento do experimento, e o custo operacional total (COT), que é a soma do COE com o custo anual de depreciação da lavoura (R\$ 623,29), calculado conforme Tabela 22.

Tabela 28 - Custo operacional total (COT) de produção para cada fertilizante nitrogenado utilizado

Tratamentos	COE	COT
Ureia	R\$ 10.323,80	R\$ 10.947,09
Sulfato de amônio	R\$ 11.337,92	R\$ 11.961,21
Nitrato de amônio	R\$ 10.389,75	R\$ 11.013,04
Ureia + Cu + B	R\$ 10.190,66	R\$ 10.813,95
Ureia + polímero aniônico	R\$ 10.396,67	R\$ 11.019,96
Ureia + S + polímeros	R\$ 12.472,98	R\$ 13.096,27
Ureia + resina	R\$ 18.188,41	R\$ 18.811,70
Ureia + NBPT	R\$ 10.286,47	R\$ 10.909,76
Ureia formaldeído	R\$ 14.175,46	R\$ 14.798,75
Ureia dissolvida	R\$ 10.323,80	R\$ 10.947,09

Fonte: Dados do autor (2016)

Observa-se, pela Tabela 28, que, na média geral, o fertilizante Ureia + Cu + B apresentou o menor custo operacional total por hectare dentre todos os demais, influenciado pelo seu menor custo por tonelada e sua alta concentração de N. Entre os fertilizantes nitrogenados convencionais, a ureia apresentou o menor custo seguido pelo nitrato de amônio, com diferença entre ambos de apenas R\$ 65,95 por hectare. O fertilizante ureia + resina apresentou o maior custo entre todos os demais, de R\$ 18.811,70 por hectare.

O alto custo desse fertilizante está relacionado aos altos custos do seu processo de fabricação e da tecnologia empregada, para sua obtenção, no caso, a resina plástica. Comercialmente, fertilizantes dessa natureza são recomendados, para a cultura cafeeira, nas ocasiões de plantio, onde as quantidades de nitrogênio aplicadas são menores do que as empregadas em fase produtiva da lavoura. Dessa forma, as quantidades utilizadas podem viabilizar sua aplicação,

em plantios de cafeeiros e, ao mesmo tempo, torna-se inviável sua utilização em fase de produção da cultura.

Os custos de produção do café podem sofrer grande variação de preços entre regiões. As maiores variações, nesse caso, são referentes aos custos com mão de obra, pela possibilidade de mecanização ou não da lavoura e as oscilações nos valores dos insumos, dentre eles os fertilizantes, entre as regiões produtoras.

Na região Sul de Minas Gerais, considerando-se a utilização dos cultivos semimecanizados, como os utilizados neste estudo, segundo dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil - CNA (2015), em parceria com o Centro de Inteligência em Mercados (CIM) da UFLA, o Custo Operacional Efetivo na região ficou entre R\$ 9.775,39 e R\$ 11.680,85, para os municípios de Guaxupé e Santa Rita do Sapucaí, respectivamente, valores próximos aos obtidos, neste trabalho, onde o menor custo, da Ureia + Cu + B, ficou em R\$ 10.190,66.

No caso específico da ureia aplicada de forma dissolvida, não foi considerado o custo de sua aplicação. No experimento, o tratamento foi aplicado, de forma manual, em total de 1,73 L de solução por planta, quantidade essa que não é viável, operacional e economicamente, para lavouras comerciais em grande escala nas ocasiões de aplicação manual ou tratorizada. No entanto, em casos específicos, como em lavouras com sistemas de irrigação implementados, onde se utiliza a fertirrigação ou em pequenas áreas, em que a escala de aplicação é reduzida, torna-se viável sua utilização, ficando a critério do produtor a decisão da aplicação dessa técnica, de acordo com sua realidade, devendo ele, nesse caso, considerar os seus custos com aplicação.

Embora tenha ocorrido ausência de diferenças significativas entre as produtividades dos tratamentos, podemos analisar, de forma pontual, a

quantidade investida (em Reais) para produção de cada quilo de café beneficiado em cada tratamento (TABELA 29).

Tabela 29 - Razão entre o Custo Operacional Total e a produtividade de café (kg).

Tratamentos	COT (R\$) / Produtividade (kg)
Ureia	R\$ 7,93
Sulfato de amônio	R\$ 7,97
Nitrato de amônio	R\$ 7,65
Ureia + Cu + B	R\$ 8,19
Ureia + polímero aniônico	R\$ 13,12
Ureia + S + polímeros	R\$ 8,40
Ureia + resina	R\$ 16,50
Ureia + NBPT	R\$ 7,27
Ureia formaldeído	R\$ 12,33
Ureia dissolvida	R\$ 9,12

Fonte: Dados do autor (2016)

Por esse ponto de vista, podemos observar que o fertilizante Ureia + NBPT, seguido pelo nitrato de amônio, com uma diferença de apenas R\$ 0,38 entre eles, necessitou de menor desembolso para produção, ou seja, apresentou um maior retorno do valor desembolsado, em termos de insumos, mão de obra e gastos com maquinário. Já o fertilizante Ureia + resina, influenciado pelo seu alto custo, apresentou o maior desembolso para obtenção de sua produtividade. O fertilizante que apresentou o menor COT entre todos os demais (Ureia + Cu + B) apresentou um valor de desembolso intermediário, de R\$ 8,19, para cada quilo de café produzido, reflexo da sua produtividade reduzida.

Comparando-se os parâmetros produtividade e COT de todos os fertilizantes em relação à ureia, fertilizante nitrogenado, amplamente, utilizado

na cafeicultura, atualmente, podemos perceber diferenças bastante discrepantes entre eles (TABELA 30).

Tabela 30 - Comparativo de diferenças em produtividade e rendimentos financeiros obtidos dos fertilizantes em relação à utilização da ureia.

Tratamentos	Varição em produtividade (Sacas) ⁽¹⁾	Saldo obtido ⁽²⁾	Diferença no custo ⁽³⁾	Margem Líquida
Ureia	-	-	-	-
Sulfato de amônio	2	R\$ 983,76	R\$ 1.014,12	R\$ - 30,36
Nitrato de amônio	1	R\$ 491,88	R\$ 65,95	R\$ 425,93
Ureia + Cu + B	- 1	R\$ - 491,88	R\$ 133,14	R\$ - 358,74
Ureia + polímero aniônico	- 9	R\$ - 4.426,92	R\$ 72,87	R\$ - 4.499,79
Ureia + S + polímeros	3	R\$ 1.475,64	R\$ 2.149,19	R\$ - 673,55
Ureia + resina	- 4	R\$ - 1.967,52	R\$ 7.864,61	R\$ - 9.832,13
Ureia + NBPT	2	R\$ 983,76	R\$ 37,33	R\$ 1.021,09
Ureia formaldeído	- 3	R\$ - 1.475,64	R\$ 3.851,66	R\$ - 5.327,30
Ureia dissolvida	- 3	R\$ - 1.475,64	R\$ 0,00	R\$ - 1.475,64

Fonte: Dados do autor (2016).

⁽¹⁾Diferenças entre as produtividades dos respectivos fertilizantes em relação à ureia;

⁽²⁾Diferença nas produtividades (positiva ou negativa) multiplicada pelo preço médio da saca de café no ano de 2015 em dólar, transformados de acordo com a taxa de câmbio em junho de 2016 (Dólar = R\$ 3,39; Café = R\$ 491,88/saca); ⁽³⁾Diferenças entre o COT do respectivo fertilizante em relação à ureia.

Pela exposição da análise acima, pode-se observar que apenas os fertilizantes nitrato de amônio e ureia + NBPT apresentaram margem líquida superior à da ureia, visto que os demais apresentaram margens negativas, ou seja, possuem rendimento menor que a ureia quando se leva em consideração custos e produtividade obtida.

Para efeito da avaliação da margem líquida obtida com os diferentes tratamentos, são necessários, ainda, mais anos de avaliação de produtividade entre eles, podendo essas tendências, aqui obtidas, serem modificadas. No entanto, se as tendências se mantiverem, conclui-se que o nitrato de amônio e a ureia + NBPT possuem maior margem de rendimento, ressalvando, é claro, com os valores atuais de aquisição dos fertilizantes.

5 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Sugere-se a continuidade dos estudos, pois acredita-se que, com o passar dos anos, as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia dos diferentes fertilizantes utilizados possam interferir na nutrição das plantas e, conseqüentemente, na produtividade futura.

Sugere-se, também, a avaliação da relação de doses de nitrogênio com as respectivas perdas, podendo, nesse caso, haver uma interação entre os fatores em relação às respostas à nutrição e produtividade.

6 CONCLUSÕES

Na média dos dois anos de avaliação e, para as condições edafoclimáticas deste trabalho, conclui-se que:

- a) Os fertilizantes ureia e ureia + polímeros aniônicos apresentam as maiores perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização e os fertilizantes sulfato de amônio, nitrato de amônio e ureia formaldeído as menores perdas.
- b) Após dois anos de aplicação dos fertilizantes, as fontes sulfato de amônio, nitrato de amônio e ureia formaldeído causam redução do pH superficial do solo.
- c) Não houve relação entre as maiores perdas com a nutrição foliar por nitrogênio. Os teores foliares de cobre e boro não foram influenciados pelos tratamentos e o uso do sulfato de amônio proporcionou maiores teores foliares de enxofre.
- d) Os fertilizantes ureia, ureia + polímeros aniônicos, ureia + Cu + B, ureia + S + polímeros e ureia + resina apresentam maior emissão média de dióxido de carbono.
- e) Não houve diferença significativa quanto à produtividade na média de dois anos entre os tratamentos.
- f) O fertilizante ureia + Cu + B apresentou o menor custo e a ureia + resina o maior custo operacional total entre os tratamentos. O uso da ureia + NBPT proporcionou a maior margem líquida até o momento avaliado, sugerindo-se a sua utilização como fonte de nitrogênio para o cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, n. 6, p. 1837-1846, June 2010.
- ASSAD, E. D. et al. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1057-1064, nov. 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. Anuário estatístico de 2014. São Paulo: ANDA, 2014. 178 p.
- BASSO, C. J. et al. Perdas de nitrogênio de dejetos líquidos de suínos por volatilização de amônia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1773-1778, nov./dez. 2004.
- BELIZÁRIO, M. **Estoque de carbono no solo e fluxo de gases de efeito estufa no cultivo de café**. 2013. 143 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, São Paulo, 2013.
- 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, 2004.
- BORKEN, W.; MATZNER, E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. **Global Change Biology**, Oxford, v. 15, n. 4, p. 808–824, Apr. 2009.
- BORTOLOTTI, R. P. et al. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigated coffee plantation. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 6, p. 785-792, nov./dez. 2013.
- BRANDEIS, H. et al. **Process for producing a slow-acting nitrogenous fertilizer mixture containing crotylidenediurea**. [S.l.: s.n.], 1965. 5 p. US Pat. 3.190.741.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n. 518, de 25 de março de 2004.** O Ministério da Saúde aprova normas e padrões de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília: Ministério da Saúde, 2004. 28 p.

BRASIL. **Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção:** quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 520 p.

BROTTO, A. C. et al. Emissão de óxido nitroso de estação de tratamento de esgoto de lodos ativados por aeração prolongada - estudo preliminar. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 618–623, mar. 2010.

CAHILL, S. et al. Evaluation of alternative nitrogen fertilizers for corn and winter wheat production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 4, p. 1226-1236, July 2010.

CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT.
Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life:
AMMONIA. Winnipeg: Canadian environmental quality guidelines, 2010. 8 p.

CANCELLIER, E. **Eficiência da ureia 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, 2008.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. P 375-470. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to increase nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 102, p. 261-316, 2009.

CHOI, W. et al. Sensitivity of soil CO₂ emissions to fertilizer nitrogen species: urea, ammonium sulfate, potassium nitrate, and ammonium nitrate. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, Essex, v. 54, n. 6, p. 1004-1007, Dec. 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB.
Acompanhamento de safra brasileira: café – segundo levantamento.
Observatório Agrícola, Brasília, v. 3, n. 2, p. 1-104, maio 2016.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA - CNA. **Resultados do projeto Campo Futuro**: levantamento de campo. Brasília: Embrapa, 2015. p. 33-55.

CORREA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY, A. J. Risk of nitrate leaching from two soils amended with biosolids. **Water Resources**, New York, v. 33, n. 4, p. 453- 462, July 2006.

CRUZ, C. J. D.; PARRON, L. M.; ROCHA, A. L. A. Disponibilidade e mobilidade de íons em solução de solo sob cultura de cafeeiro. In. SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa, 2008.

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.

DENMEAD, O. T.; FRENEY, J. R.; DUNIN, F. X. Gas exchange between plant canopies and the atmosphere: case studies for ammonia. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 42, n. 14, p. 3394–3406, May 2008.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

FAGUNDES, A. V. **Adubação líquida na implantação da lavoura cafeeira (*Coffea arabica* L.)**. 2006. 54 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

FAN, X. H.; LI, Y. C. Nitrogen release from slow-release fertilizers as affect by soil type and temperature. **Soil Science Society of American Journal**, Amsterdam, v. 74, n. 5, p. 1635-1641, Sept. 2010.

FAQUIN, V.; ANDRADE, A. T. **Nutrição mineral e diagnose do estado nutricional das hortaliças**. Lavras: Editora da UFLA, 2004. 88 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.

FARIA, L. A. et al. 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.

FENILLI, T. A. B. et al. Growth, development and fertilizer-¹⁵N recovery by the coffee plant. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 5, p. 541-547, set./out. 2007.

FENN, L. B.; MIYAMOTO, S. Ammonia loss and associated reactions of urea in calcareous soils. **Soil Science Society American Journal**, Amsterdam, v. 45, n. 3, p. 537-540, Sept. 1981.

FERGUNSON, M. E.; HUGHES, R. R.; FERSCH, K. E. **Urea-formaldehyde granular fertilizer**. [S.l.: s.n.], 1981. 6 p. US Pat. 4.280.830.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JUNIOR, E. F. Doses de fontes nitrogenadas convencionais e nitrogênio polimerizado na produtividade e maturação do cafeeiro irrigado. **Faculdade de Agronomia e Zootecnia de Uberaba em Revista**, Uberaba, n. 7, p. 37-41, 2010.

FERNANDES, A. L. T.; SANTINATO, R.; SILVA, R. O. Avaliação do efeito do ciclo NKS no crescimento, nutrição mineral e produtividade do cafeeiro irrigado e cultivado em condições de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 37., 2010, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Sbicafé, 2010. p. 138-139.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dec. 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, out. 2010.

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.

GIRARDI, E. A.; MOURÃO FILHO, F. A. A. Crescimento inicial de laranjeira 'Valência' sobre dois porta-enxertos em função da adubação nitrogenada no plantio. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 117-119, abr. 2004.

GROHS, M. et al. Response of rice to the use of urease inhibitor in no-tillage and conventional. **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: Editora da UFV, 1999. p. 289-302.

HEFFER, P.; PRUD'HOMME, M. Fertilizer outlook 2014-2018. In: INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION ANNUAL CONFERENCE SYDNEY, 82., 2014, Australia. **Proceedings...** Australia: IFA, 2014. p. 1-9.

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

HOLCOMB, J. C. et al. Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. **Soil Science Society of American Journal**, Amsterdam, v. 75, n. 6, p. 2341-2347, Nov. 2011.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2001: the scientific basis**. United Kingdom: Cambridge University, 2001. 881 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama: IGES, 2006. INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION - IFA. **Produção, importação, exportação e consumo de nitrogênio, fósforo e potássio de 1973/1974 a 2007/2008**. Paris: IFA, 2010.

INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE – IPNI. Disponível em: <<http://www.brasil.ipni.net/article/BRS-3132#aparente>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

- JACINTHE, P. A.; LAL, R. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, n. 1/2, p. 35-45, Jan. 2005.
- JAHNS, T. et al. Biodegradation of slow-release fertilizers (Methyleneureas) in soil. **Journal of Environmental Polymer Degradation**, Amsterdam, v. 7, n. 2, p. 75-82, Apr. 1999.
- JIANG, Z. et al. Ammonia volatilization and availability of Cu, Zn induced by applications of urea with and without coating in soils. **Journal of Environmental Sciences**, Beijing, v. 24, n. 1, p. 177-181, 2012.
- KEALY, J. P. **Urea-formaldehyde polymers of high agronomic value**. [S.l.: s.n.], 1960. 11 p. US Pat. 2.955.930.
- KRAJEWSKA, B. Ureases I. functional, catalytic and kinetic properties: a review. **Journal of Molecular Catalysis**, Amsterdam, v. 59, n. 1/3, p. 9-21, July 2009.
- KRAJEWSKA, B.; ZABORSKA, W.; CHUDY, M. Multi-step analysis of Hg²⁺ ion inhibition of jack bean urease. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 98, n. 6, p. 1160-1168, June 2004.
- LARA CABEZAS, W. A. R. et al. 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, ago. 2004.
- 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 Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2331-2342, 2008.
- LIMA, L. C. et al. Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado, em função de diferentes fontes de nitrogênio. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 97-107, jan./mar. 2016.
- LORENSINI, F. et al. Lixiviação e volatilização de nitrogênio em um Argissolo cultivado com videira submetida à adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 7, p. 1173-1179, jul. 2012.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, mar./abr. 2005.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 683 p.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**: colheitas econômicas máximas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1993. 210 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p. 165-274.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Fosfato, 1997. 238 p.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de Café no Brasil**: novo manual de recomendações. MAPA, Fundação Procafé, 2010. 546 p.

MATSUNAGA, M. et al. Metodologia de custo de produção utilizado pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 123-139, jul. 1976.

MATTOS JUNIOR, D. et al. Nitrogen volatilization and mineralization in a sandy soil of Florida under citrus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 13/14, p. 1803-1824, 2003.

MEESSEN, J.; PETERSEN, H. **Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2000. 36 p.

MENENDEZ, S. et al. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate on gaseous emissions from grasslands under different soil water contents. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 38, n. 1, p. 27-35, Jan. 2009.

MILLS, H. A.; JONES JUNIOR, J. B. **Plant analysis handbook II**. 2. ed. Athens: Micro-Macro, 1996. 422 p.

MOITINHO, M. R. et al. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1720-1728, 2013.

MORELL, F. J. et al. Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: effects of tillage systems and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Washington, v. 139, n. 1/2, p. 167-173, Oct. 2011.

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.

NASH, P. R.; MOTAVALLI, P. P.; NELSON, K. A. Nitrous oxide emissions from claypan soils due to nitrogen fertilizer source and tillage/fertilizer placement practices. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 983-993, May 2012.

NASSER, M. D. et al. Análise econômica da produção de café arábica em São Sebastião do Paraíso, estado de Minas Gerais. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 42, n. 2, p. 5-12, mar./abr. 2012.

NIELSEN, D. R. et al. Nitrogen transport process in soil. In: STEVENSON, P. J. (Ed.). **Nitrogen in agriculture soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 423-448.

NOGUEIRA, M. P. **Importância da gestão de custos**: curso online: módulo I: gestão de custos e avaliação de resultados. [S.l.]: Agripoint, 2004.

NÔMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 39, n. 2, p. 309-318, Oct. 1973.

OLIVEIRA JÚNIOR, G. G. et al. Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 412 - 419, out./dez. 2015.

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 CAFEEIRAS, 38., 2011, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Sbicafé, 2011. p. 120-121.

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, 2009.

PORT, O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Perda de nitrogênio por volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 857-865, 2003.

RASTOGI, M.; SINGH, S.; PATHAK, H. Emission of carbon dioxide from soil. **Current Science**, Columbus, v. 82, n. 5, p. 510-517, Mar. 2002.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia do cafeeiro**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 119-147.

REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. **Plant analysis: an interpretation manual**. Melbourne: Inkata, 1988. 218 p.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas a Gerais: 5 aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

ROBERTS, J. R. **Stabilized N-Alkyl thiphosphoric triamide solvent systems for use in nitrogen fertilizer**. [S.l.: s.n.], 2014. 4 p. US Pat.2014/0060132 A1.

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.

ROJAS, C. A. L. et al. Volatilização de amônia da ureia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 261-270, 2012.

ROS, C. O. da; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 799-805, ago. 2005.

SÁ JÚNIOR, A. de et al. Application of the Koppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 108, p. 1-7, 2012.

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.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T. **Cultivo do cafeeiro irrigado em plantio circular sob pivô central**. Rio de Janeiro: MAPA, 2002. 250 p.

SANTOS, H. G. dos (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SCHLESINGER, W. H. Carbon and agriculture: carbon sequestration in soils. **Science**, Washington, v. 284, n. 5423, p. 2095-2095, June 1999.

SELIG, M. F.; SEILER, J. R.; TYREE, M. C. Soil carbon and CO₂ efflux as influenced by the thinning of loblolly pine (*Pinustaeda L.*) plantations on the Piedmont of Virginia. **Forest Science**, Bethesda, v. 54, n. 1, p. 58-66, Feb. 2008.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005. **Anais...** Frankfurt: IFA, 2005.

SISTANI, K. R. et al. Greenhouse gas emissions from swine effluent applied to soil by different methods. **Soil Science Society of American Journal**, Amsterdam, v. 74, n. 2, p. 429-435, Mar./Apr. 2010.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of American Journal**, Amsterdam, v. 63, n. 5, Sept. p. 1350-1358, 1999.

SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences**, London, v. 363, n. 1492, p. 789-813, Feb. 2008.

SOARES, J. R.; CANTARELLA, H.; MENEGALE, M. L. D. C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 52, p. 82–89, Sept. 2012.

SOBREIRA, F. M. et al. Adubação nitrogenada e potássica de cafeeiro fertirrigado na fase de formação em plantio adensado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 1, p. 9-16, jan. 2011.

SOMMER, S. G.; SCHJOERRING, J. K.; DENMEAD, O. T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 82, p. 557-621, 2004.

SOUZA, J. A. **Lixiviação de nitrato e volatilização de amônia em um latossolo cultivado com café sob diferentes fontes de nitrogênio**. 2012. 74 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

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.

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

TEODORO, R. E. F. et al. Influência de diferentes reduções e aumento das doses de fertilizantes aplicados em fertirrigação, nos parâmetros de crescimento do cafeeiro. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 14., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2004. p. 5.

TIAN, Z. et al. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 533, p. 329–338, Nov. 2015.

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

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4. ed. New York: Macmillan, 1985. 754 p.

TOWNSEND, C. R.; BEGON, M.; HARPER, J. L. **Fundamento em ecologia**. 2. ed. Artmed, 2006. 592 p.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 167 p.

VAN RAIJ, B. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p.

VENTEREA, R. T.; BURGER, M.; SPOKAS, K. A. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 34, n. 5, p. 1467-1477, Aug. 2005.

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1515-1525, 2014.

WANG, X.; CUI, J.; ZHOU, J. Ammonia volatilization of controlled-release urea enveloped with colophony from paddy field in typical red soil. **Soils**, Longjumeau, v. 43, n. 1, p. 56-59, 2011.

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.

WHITEHURST, G. B.; WHITEHURST, B. H. **NBPT solution for preparing urease inhibited urea fertilizers prepared from N-ALKYL; N,N-ALKYL; AND N-ALKYL-N-ALKYLOXY amino alcohols**. [S.l.: s.n.], 2014. 21 p. US Pat. 2010/0037570 A1.

WILLSON, K. C. Mineral nutrition and fertilizer needs. In: CLIFORD, N. N.; WILLSON, K. C. (Ed.). **Coffee botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 135-156.

YANG, Y. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield. **Soil Science Society of American Journal**, Amsterdam, v. 76, n. 6, p. 2307-2317, Oct. 2012.

APÊNDICE A – Resumo da análise de variância da volatilização de amônia durante o primeiro ano de avaliações

FV	GL	QMs e Significância do teste F			
		1ª Adubação	2ª Adubação	3ª Adubação	Média
Fertilizantes	9	564,55*	404,04*	1083,00*	609,94*
Bloco	2	8,90	1,84	13,03	0,17
Erro	18	8,92	2,41	15,90	3,90
CV (%)		22,32	15,09	18,45	13,08

*Significativo a 1% pelo teste F.

APÊNDICE B – Resumo da análise de variância da volatilização de amônia durante o segundo ano de avaliações

FV	GL	QMs e Significância do teste F			
		1ª Adubação	2ª Adubação	3ª Adubação	Média
Fertilizantes	9	610,73*	1222,97*	346,60*	736,59*
Bloco	2	6,28	20,63	6,84	4,83
Erro	18	11,29	20,85	5,91	8,15
CV (%)		22,97	20,08	22,05	16,57

*Significativo a 1% pelo teste F.

**APÊNDICE C – Resumo da análise de variância dos valores de fluxo de
CO₂**

FV	GL	QMs e Significância do teste F			
		1ª Adubação	2ª Adubação ⁽¹⁾	3ª Adubação	Média ⁽¹⁾
Tratamentos	10	252655,69*	0,41*	1607140,29	0,13*
Bloco	2	46196,56	0,08	1454222,71	0,02
Erro	20	63260,19	0,01	1087178,15	0,04
CV (%)		19,32	1,4	32,53	2,53

*Significativo a 1% pelo teste F. ⁽¹⁾Dados originais transformados por Ln (x) por não apresentarem normalidade de distribuição.

APÊNDICE D – Resumo da análise de variância dos teores foliares de nitrogênio no primeiro e segundo anos de avaliações

FV	GL	QMs e Significância do teste F	
		Ano 1	Ano 2
Fertilizantes	9	2,68 ^{ns}	19,60**
Bloco	2	8,51	30,17
Erro1	18	2,95	7,90
Época	3	124,10*	27,54***
Erro 2	6	0,87	7,61
Fertilizantes x Épocas	27	1,96 ^{ns}	11,78 ^{ns}
Erro 3	54	1,60	8,54
CV Fertilizantes (%)		6,14	9,25
CV Épocas (%)		3,34	9,08
CV Fertilizantes x Épocas (%)		4,52	9,62

*Significativo a 1% pelo teste F; **Significativo a 5% pelo teste F; ***Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não significativo.

APÊNDICE E – Resumo da análise de variância dos teores foliares de enxofre no primeiro e segundo anos de avaliações

FV	GL	QMs e Significância do teste F	
		Ano 1	Ano 2
Fertilizantes	9	0,22 ^{ns}	7,11*
Bloco	2	0,17	1,52
Erro1	18	0,15	0,77
Época	3	5,30*	12,01*
Erro 2	6	0,05	0,70
Fertilizantes x Épocas	27	0,06 ^{ns}	2,30 ^{ns}
Erro 3	54	0,09	0,95
CV Fertilizantes (%)		15,98	8,09
CV Épocas (%)		9,17	7,71
CV Fertilizantes x Épocas (%)		12,62	9,02

*Significativo a 1% pelo teste F; ^{ns} Não significativo.

**APÊNDICE F – Resumo da análise de variância dos teores foliares de cobre
no primeiro e segundo anos de avaliações**

FV	GL	QMs e Significância do teste F	
		Ano 1	Ano 2
Fertilizantes	9	63,72 ^{ns}	10,32 ^{ns}
Bloco	2	69,14	22,31
Erro1	18	76,98	28,97
Época	3	1298,01*	729,63*
Erro 2	6	116,87	34,28
Fertilizantes x Épocas	27	26,46 ^{ns}	47,16*
Erro 3	54	35,25	15,20
CV Fertilizantes (%)		39,07	35,20
CV Épocas (%)		48,13	38,29
CV Fertilizantes x Épocas (%)		26,44	25,50

*Significativo a 1% pelo teste F; ^{ns} Não significativo.

**APÊNDICE G – Resumo da análise de variância dos teores foliares de boro
no primeiro ano de avaliações**

FV	GL	QMs e Significância do teste F
Fertilizantes	9	103,21 ^{ns}
Bloco	2	276,72
Erro 1	18	49,93
Época	3	4949,95*
Erro 2	6	136,93
Fertilizantes x Épocas	27	47,39 ^{ns}
Erro 3	54	39,74
CV Fertilizantes (%)		17,94
CV Épocas (%)		29,71
CV Fertilizantes x Épocas (%)		16,00

*Significativo a 1% pelo teste F; ^{ns} Não significativo.

APÊNDICE H – Resumo da análise de variância dos valores de ph para o primeiro e segundo anos de avaliações

FV	GL	QMs e Significância do teste F	
		Ano 1	Ano 2
Fertilizantes	9	0,60***	2,77*
Bloco	2	0,22	0,97
Erro1	18	0,28	0,34
Época	3	20,80*	1,02**
Erro 2	6	0,24	0,21
Fertilizantes x Épocas	27	0,21ns	0,31ns
Erro 3	54	0,18	0,12
CV Fertilizantes (%)		10,30	10,43
CV Épocas (%)		9,56	8,17
CV Fertilizantes x Épocas (%)		8,17	6,05

*Significativo a 1% pelo teste F; **Significativo a 5% pelo teste F; ***Significativo a 10% pelo teste F; ^{ns} Não significativo.

APÊNDICE I - Análise de variância da produtividade no ano de 2014

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Fertilizantes	9	922,70	102,52	1,75	0,15
Bloco	2	299,40	149,70	2,55	0,11
Erro	18	1054,60	58,59		
Total	29	29	2276,70		
CV (%)	34,64				

**APÊNDICE J - Análise de variância conjunta das produtividades dos anos
de 2015 e 2016**

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr > Fc
Ano	1	112,07	112,07	2,20	0,14
Bloco (Ano)	4	606,07	151,52	2,98	0,03
Fertilizantes	9	623,6	69,29	1,36	0,24
Ano x Fertilizantes	9	1185,93	131,77	2,59	0,02
Erro	36	1831,26	50,87		
Total	59	4358,93			
CV (%)	39,33				