**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Manejo da adubação nitrogenada com misturas de ureia revestida com
NBPT e ureia revestida com enxofre e polímeros em sistemas de
produção de milho**

Bruno Paulo Moschini

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2019**

Bruno Paulo Moschini
Engenheiro Agrônomo

Manejo da adubação nitrogenada com misturas de ureia revestida com NBPT e ureia revestida com enxofre e polímeros em sistemas de produção de milho
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Moschini, Bruno Paulo

Manejo da adubação nitrogenada com misturas de ureia revestida com NBPT e ureia revestida com enxofre e polímeros em sistemas de produção de milho / Bruno Paulo Moschini. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2019.

171 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Acúmulo de nitrogênio 2. Fertilizantes de eficiência aumentada 3. Nitrogênio mineral no solo 4. Recuperação do nitrogênio 5. Sustentabilidade 6. Viabilidade econômica I. Título

**Aos meus amados pais, Paulo Sérgio Moschini e
Vilma Donata Bedendo Moschini, pelo amor,
incentivo, carinho e compreensão.**

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), bem como o Programa de Pós-Graduação (PPG) em Solos e Nutrição de Plantas do Departamento de Solos, pelo ensino de excelência, infraestrutura e oportunidade de cursar o doutorado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP), em especial ao Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE), pela infraestrutura durante o desenvolvimento das atividades de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo (processo nº – 542070) durante o doutorado, por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX, edital – 0487).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a pesquisa e pelo financiamento de parte das ações de pesquisa (processo nº– 442691/2014-9 – Chamada Universal – MCTI/CNPq nº - 14/2014).

À Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa e pelo fornecimento da área para a realização dos experimentos de campo durante as safras 2016/17 e 2017/18 no Centro de Pesquisa Geraldo Schultz, Iracemápolis, Estado de São Paulo, Brasil. Agradecimentos especiais à Ithamar Prada Neto, Fabio Scudeler, Daniela Vitti, Jose Marcos Leite e Carlos Roberto Sant’Ana Filho, por todo o apoio, incentivo e ajuda durante a etapa de pesquisa.

Ao Grupo Agro-Pastoril Paschoal Campanelli S.A. pelo fornecimento da infraestrutura e apoio integral para a realização dos experimentos de campo em suas áreas de produção de cana-de-açúcar/milho durante as safras 2015/16 e 2016/17. Agradecimentos especiais ao Victor, Fabio e Ricardo Campanelli, pela paciência e disposição em ajudar e ao entusiasmo na realização da pesquisa em uma área comercial.

Ao Prof. Dr. Paulo César Ocheuze Trivelin, meu orientador de doutorado, pelo contínuo apoio em nossos estudos e pesquisas. Pelo entusiasmo e critério que coloca em todas as suas atividades de pesquisa e ensino, sua motivação e seu vasto conhecimento certamente será lembrado e terá grande valia durante toda a minha vida profissional. Agradeço pela sua orientação durante todos esses anos, permitindo-me vivenciar experiências valiosas que contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal. Obrigado por toda a paciência, compreensão e por acreditar no meu potencial para me aceitar como parte de sua equipe de

pesquisa, serei eternamente grato pela oportunidade concedida e pelo privilégio de sua orientação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação (PPG) em Solos e Nutrição de Plantas do Departamento de Ciência do Solo, por suas contribuições durante a minha formação acadêmica e por serem receptivos a perguntas e dúvidas dentro e fora da sala de aula, sempre prontos a oferecer bons conselhos e ajuda em relação às questões da vida acadêmica. Agradecimentos especiais aos professores Rafael Otto e Paulo Sergio Pavinato, pela orientação em aprimorar a minha formação no desenvolvimentos das atividades didáticas como monitor da disciplina de adubos e adubação através do Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE).

Aos meus colegas de laboratório no LIE – CENA – USP durante meu doutorado: Beatriz Nastaro Boschiero, Eduardo Mariano, Pedro L. Garcia, Nicole C. Cheng, Luis Rinaldi, Gabriela Salgado e Saulo A. Q. de Castro, pelo convívio fraterno, colaboração e companherismo em todo o processo de aprendizado que vivenciamos juntos, além dos momentos de descontração compartilhados. Agradecimento especial ao Hugo A. González-Villalba, desde o início do meu doutorado, por sua assitência, conhecimento e ensinamentos e sua vasta paciência com o meu projeto de pesquisa.

Aos funcionários e a equipe do LIE – CENA – USP: Prof. Dr. José A. Bendassoli, Magda Bartolamei, José A. Bonassi, Bento M. Moraes Neto, Clelber V. Prestes, Miguel L. Bladessin e Cristina Salvego pela cordialidade no ambiente de trabalho. Em especial, agradeço aos técnicos Hugo G. Batagello e Ana Paula G. M. Duarte, pela assitência técnica e os seus ensinamentos que me permitiram vivenciar experiências únicas que contribuíram para o meu crescimento pessoal.

A todos os estagiários, especialmente, Henrique C. Medes, Catherine M. Zulian, Mayara A. Arioza, Elias Dias, Mateus Rodrigues, Gustavo J. Soares, Maick M. Gonzaga e Cátia B. C. Pereira pelo auxílio e colaboração durante as atividades e experimentos de campo.

Aos meus grandes amigos Filipe Franco, Ana Rosália Calixto, Alessandra T. Miceli, Camila Colamego, Natalia Paschoalino, Camila Rosa, Nayara Marucci, Lisiane Brichi, Amanda Avelar e muitos outros colegas e amigos que foram essenciais nesse período da minha vida e por todos os bons momentos que tivemos juntos durante todo esse tempo de amizade. Em especial, agradeço à Laís Moretti por estar sempre disposta em me ajudar e pelos laços sinceros e fraternos construídos ao longo de tantos anos de amizade. À Nicole C. Cheng por me auxiliar e ajudar em todas as etapas da minha vida durante esse período no doutorado, pela paciência e convivência harmoniosa e a sua amizade sincera.

Para a minha família, por todo o apoio às minhas escolhas profissionais. Aos meus queridos pais, Paulo Sérgio Moschini e Vilma Donata Bedendo Moschini, pelo infinito amor, compaixão, apoio e paciência incondicional ao longo de todos os anos de estudo; Por ensinarem a mim o exemplo de ser uma pessoa honesta e íntegra. Para a minha tia Natalina Bedendo, com sua simplicidade e imenso coração e bondade, sempre acreditou em mim e me encorajou a perseguir meus sonhos independentemente dos obstáculos a serem superados.

A todos aqueles não mencionados nominalmente que contribuíram para a realização desse trabalho e que tiveram um papel muito importante nessa jornada.

MUITO OBRIGADO!

**“ Os grandes feitos são conseguidos
não pela força, mas pela perseverança ”**

Samuel Johnson, escritor e pensador inglês (1709 – 1784)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	12
1. INTRODUÇÃO.....	13
REFERÊNCIAS.....	19
2. FONTES E DOSES DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	25
RESUMO.....	25
ABSTRACT.....	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	26
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
2.2.1 Localização, manejo, tratamentos e delineamento experimental.....	28
2.2.2 Avaliações e análises estatísticas.....	31
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
2.3.1 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas do milho.....	33
2.3.2 Produtividade de grãos e índices de eficiência de uso de N pelo milho.....	39
2.3.3 Disponibilidade do N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$).....	42
2.4 CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS.....	47
3. VIABILIDADE ECONÔMICA DE FONTES E DOSES DE N NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	55
RESUMO.....	55
ABSTRACT.....	55
3.1 INTRODUÇÃO.....	56
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	58
3.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo.....	58
3.2.2 Avaliações e análises estatísticas.....	61
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
3.4 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS.....	68

4. MODOS DE APLICAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO COM USO DE <i>BLEND</i> CONTENDO UREIA REVESTIDA COM ENXOFRE ELEMENTAR E POLÍMERO NA CULTURA DO MILHO EM SUCESSÃO A CANA-DE-AÇÚCAR.....	73
RESUMO.....	73
ABSTRACT.....	73
4.1 INTRODUÇÃO.....	74
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	76
4.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo.....	76
4.2.2 Avaliações e análises estatísticas.....	79
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81
4.4 CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
5. CUSTO E RENTABILIDADE DO USO DE <i>BLEND</i> CONTENDO UREIA REVESTIDA COM ENXOFRE ELEMENTAR E POLÍMERO APLICADA EM COBERTURA E INCORPORADA AO SOLO NO RENDIMENTO DO MILHO.....	99
RESUMO.....	99
ABSTRACT.....	99
5.1 INTRODUÇÃO.....	100
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	102
5.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo.....	102
5.2.2 Avaliações e análises estatísticas.....	104
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	106
5.4 CONCLUSÕES.....	112
REFERÊNCIAS.....	113
6. FONTES E DOSES DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE <i>Brachiaria ruziziensis</i>	117
RESUMO.....	117
ABSTRACT.....	117
6.1 INTRODUÇÃO.....	118
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	120
6.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo.....	120
6.2.2 Volatilização de amônia (NH ₃).....	123
6.2.3 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio.....	124
6.2.4 Produtividade de grãos, disponibilidade do N mineral no solo (N-NO ₃ ⁻ + N-NH ₄ ⁺)	

e viabilidade econômica.....	125
6.2.5 Determinação de ^{15}N	126
6.2.5 Análises estatísticas.....	128
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	129
6.3.1 Volatilização de amônia (NH_3).....	129
6.3.2 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio.....	134
6.3.3 Produtividade de grãos, disponibilidade do N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) e viabilidade econômica.....	141
6.3.4 Contribuição das fontes de nitrogênio no <i>blend</i> de U+UREP para o acúmulo de N na planta e eficiência do N-fertilizante.....	148
6.4 CONCLUSÕES.....	153
REFERÊNCIAS.....	153
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	163
REFERÊNCIAS.....	168

RESUMO

Manejo da adubação nitrogenada com misturas de ureia revestida com NBPT e ureia revestida com enxofre e polímeros em sistemas de produção de milho

O uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada, em especial o *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar e polímeros (U+UREP) consiste em uma alternativa para fornecer nitrogênio (N) nos estádios fenológicos do milho garantindo a sustentabilidade agrícola, além de ser uma opção válida para reduzir os custos em comparação ao uso exclusivo de fertilizantes de liberação controlada. Os objetivos do trabalho foram: (1) avaliar o manejo da adubação nitrogenada em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho com *blend* de U+UREP, comparados com fertilizantes nitrogenados convencionais, além de avaliar a viabilidade econômica do custo da adubação nitrogenada e a margem de lucratividade nesse sistema de manejo; (2) avaliar os modos de aplicação e doses de N utilizando o *blend* de U+UREP no mesmo sistema de cultivo anteriormente citado, além de avaliar o custo e a rentabilidade desse manejo; (3) avaliar o destino do N-fertilizante dentro das plantas de milho proveniente do *blend* de U+UREP por meio do método isotópico (^{15}N) e do método da diferença, além de avaliar a volatilização de NH_3 , a viabilidade econômica do custo da adubação e outros parâmetros de crescimento das plantas quando comparados com a U e o NA em um sistema de sucessão *Brachiaria ruziziensis*/milho. No primeiro estudo, a conversão de um sistema de cultivo de cana-de-açúcar para milho com alto aporte de palha tem influência marcante nas transformações do N no sistema solo-planta-atmosfera, sendo que a produção de biomassa seca (BS) foi pouco influenciada entre os fertilizantes avaliados aplicados no estágio V4 do milho, diferindo-se apenas do tratamento controle. As condições climáticas (intensidade e distribuição das chuvas) se apresentaram como um fator limitante para o rendimento da cultura. No segundo estudo, a viabilidade econômica no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho mostrou que o custo da adubação nitrogenada foi impulsionada pelo preço dos fertilizantes nitrogenados e aumento das doses de N, sendo que a adubação com o *blend* de U+UREP não mostrou-se ser uma alternativa economicamente viável no cultivo do milho, independentemente das doses e dos anos de cultivo avaliados. A adubação com $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ na forma de U promoveu a maior margem de lucratividade. No terceiro estudo, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura no sistema de cultivo de cana-de-açúcar/milho foi observado as maiores médias de produção de BS e acúmulo N, independentemente da dose de N avaliada, sendo que a aplicação de $194 \text{ kg de N ha}^{-1}$ do *blend* de U+UREP proporcionou a máxima produtividade de grãos de milho. No quinto capítulo, o estudo do custo e rentabilidade do modo de aplicação do *blend* de U+UREP mostrou que a aplicação em cobertura de $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ proporcionou os maiores valores de produtividade de grãos, receita bruta e custo operacional total, enquanto que o maior lucro operacional e índice de lucratividade foi obtido com a aplicação incorporada de $150 \text{ kg de N ha}^{-1}$. No sexto capítulo, o *blend* de U+UREP foi capaz de reduzir as perdas por volatilização de NH_3 , entretanto, as condições climáticas podem ter influenciado a produção de BS, o acúmulo de N e a ausência de resposta na produtividade de grãos em ambas as safras. O N proveniente do solo foi a principal fonte de N para as plantas durante o ciclo de cultivo, sendo que a % NBPTUplanta foi de 14% e a % URPlanta de 23%.

Palavras-chave: Acúmulo de nitrogênio; Fertilizantes de eficiência aumentada; Nitrogênio mineral no solo; Recuperação do nitrogênio; Sustentabilidade; Viabilidade econômica

ABSTRACT

Management of nitrogen fertilization with mixtures of NBPT-treated urea and polymer sulfur coated urea in corn production systems

The use of nitrogen fertilizers of increased efficiency, especially the blend of conventional urea treated with NBPT and urea coated with elemental sulfur and polymers (U+UREP), is an alternative to provide nitrogen (N) in the phenological phases of maize, guaranteeing sustainability agriculture, as well as being a valid option to reduce costs compared to the exclusive use of controlled release fertilizers. The objectives of the study were: (1) to evaluate the management of nitrogen fertilization in a sugarcane/corn succession system with blend U+UREP, compared to conventional nitrogen fertilizers, and to evaluate the economic viability of fertilization cost nitrogen balance and profit margin in this management system; (2) to evaluate the application modes and N doses using the blend U+UREP in the same cultivation system mentioned above, besides evaluating the cost and profitability of this management; (3) to evaluate the fate of the N-fertilizer within the corn plants from the blend U+UREP using the isotopic method (^{15}N) and the difference method, besides evaluating NH_3 volatilization, the economic feasibility of the cost of fertilization and other plant growth parameters when compared to U and NA in a *Brachiaria ruziziensis*/maize succession system. In the first study, the conversion of a sugarcane cultivation system to corn with high straw yields had a marked influence on N transformations in the soil-plant-atmosphere system, and the production of dry biomass (DB) was little influence among the evaluated fertilizers applied in the stage V4 of the corn, differing only from the control treatment. The climatic conditions (intensity and distribution of rainfall) were presented as a limiting factor for crop yield. In the second study, economic viability in the sugarcane/corn succession system showed that the cost of nitrogen fertilization was driven by the price of nitrogen fertilizers and increase of N rates, and the fertilization with the blend U+UREP did not prove to be an economically viable alternative to maize cultivation, regardless of the doses and the years of cultivation evaluated. Fertilization with 300 kg of N ha⁻¹ in the U-form promoted the highest profit margin. In the third study, when the blend U+UREP was applied under cover in the sugarcane/maize cultivation system, the highest production averages of DB and N accumulation were observed, regardless of the N dose evaluated, and the application of 194 kg of N ha⁻¹ from the blend U+UREP provided the maximum yield of corn grains. In the fifth chapter, the study of the cost and profitability of the application of the blend U+UREP showed that the application in coverage of 300 kg of N ha⁻¹ provided the highest values of grain yield, gross revenue and total operating cost, while the highest operating profit and profitability index was obtained with the incorporated application of 150 kg of N ha⁻¹. In the sixth chapter, the blend U+UREP blend was able to reduce NH_3 volatilization losses; however, climatic conditions may have influenced DB production, N accumulation and lack of response in grain yield in both crops. N from the soil was the main source of N for the plants during the growing cycle, with the % NBPTU_{plant} was 14% and the % UREP_{plant} was 23%.

Keywords: Nitrogen accumulation; Increased efficiency fertilizers; Mineral nitrogen in soil; Nitrogen recovery; Sustainability; Economic viability

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de grãos na safra 2017/18 será de aproximadamente 2,6 bilhões de toneladas (FAO, 2018). O cereal mais produzido no mundo é o milho (*Zea mays* L.), que segundo estimativas terá produção de 1,0 bilhão de toneladas (FIESP, 2018). Os Estados Unidos da América são os maiores produtores, com produção na safra 2017/18 de 371,0 milhões de toneladas, seguido por China (215,9 milhões de toneladas) e Brasil (88,6 milhões de toneladas) (CONAB, 2018; FIESP, 2018; USDA, 2018). A produção do milho de segunda safra (safrinha) superou o de primeira safra, tornando o Brasil o terceiro maior produtor e o segundo maior exportador mundial. Apesar do alto potencial produtivo da cultura do milho, evidenciado por produtividades de 10 Mg ha⁻¹, alcançadas no Brasil em condições especiais e por produtores que adotam alta tecnologia nos sistemas de cultivo, o que se observa na prática é a produção baixa e irregular de 2 a 3 Mg ha⁻¹ (ZAVASCHI, 2010). Mesmo que a produção seja significativa em termos de grandeza, a produtividade média brasileira é muito baixa em comparação aos Estados Unidos da América, sugerindo que os sistemas de cultivo podem ser melhorados, especialmente quanto à nutrição mineral, para assegurar a competitividade da commodity no mercado financeiro (IFA, 2017).

O nitrogênio (N) é o nutriente requerido em maior quantidade e o que mais limita o rendimento na produção de grãos de milho (LADHA et al., 2016). Dessa forma, o solo muitas vezes é incapaz de fornecer todo o N requerido para o ciclo da cultura, sendo necessário o uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos para alcançar o ótimo rendimento. De fato, como apontado por Erisman et al. (2008), aproximadamente metade da população mundial é nutrida por cultivos com fertilizantes nitrogenados sintéticos, que só foi possibilitado devido ao processo Haber-Bosch no início do século XX. O mau gerenciamento dos fertilizantes nitrogenados e as práticas inadequadas no manejo dos mesmos podem ter um impacto adverso na proteção ambiental dos ecossistemas e para a segurança alimentar (REETZ, 2017). O N dos fertilizantes sintéticos aplicados ao solo e não absorvido pelas plantas pode sofrer múltiplas transformações nos sistemas de cultivo, possibilitando perdas do nutriente nos solos agrícolas por meio da lixiviação de nitrato (NO₃⁻), volatilização de amônia (NH₃), emissão de óxido nitroso (N₂O), desnitrificação e outras vias de perda (YAMADA; ABDALLA, 2000; GALLOWAY et al., 2008; OTTO et al., 2017). Assim, para atender às futuras necessidades mundiais da segurança alimentar e sustentabilidade, a produção de alimentos deve crescer substancialmente, enquanto, ao mesmo tempo, os impactos na agricultura e no ambiente por práticas inadequadas de manejo devem diminuir drasticamente (FOWLEY et al., 2011).

A recuperação global do N-fertilizante na produção de cereais de primeira safra é estimada entre 30 a 50%, sendo que o N aplicado, proveniente da adubação, que permanece no solo é pouco recuperado nos cultivos seguintes (menor que 7% do N aplicado em até seis colheitas consecutivas) ou é perdido no sistema solo-planta-atmosfera (LADHA et al., 2005). Pires et al. (2015) realizaram uma análise dos sistemas de cultivo de cereais no Brasil, constatando uma redução de aproximadamente 74% na eficiência de uso do nitrogênio (EUN) com uma taxa decrescente de 2,4% ao ano entre o período de 1970 e 2011, indicando que o N aplicado que não é absorvido pelas plantas pode prejudicar o ambiente e os recursos naturais. Isso significa que a EUN está em torno de 26% no cultivo de cereais sob condições tropicais. Assim, fica evidente a importância da adoção de práticas agrícolas (manejo dos fertilizantes nitrogenados) que permitam o aumento da EUN para substituir práticas agrícolas convencionais insustentáveis.

Por meio da cooperação de esforços de institutos e centros de pesquisas como a International Plant Nutrition Institute (IPNI), Fertilizer Institute (TFI), Fertilizer Canada e a International Fertilizer Industry Association (IFA), juntamente com membros de outras organizações, foi desenvolvido uma estrutura global de melhores práticas de manejo de fertilizantes (MPMF) que está sendo adotada como um guia de gestão de nutrientes, o conceito da gestão 4C's para manejo de fertilizantes. O conceito da gestão 4C's é uma abordagem moderna para aumentar a eficiência de uso dos nutrientes e consiste na aplicação da fonte certa, dose certa, época certa e local certo. Portanto, posicionar corretamente um fertilizante exige conhecer sua dinâmica no solo e na planta, que, cruzada com os demais C's, fecham as quatro medidas para o uso eficiente dos fertilizantes para se atingir metas de aumentos de produção nos sistemas de cultivo, aumentos na lucratividade da atividade ao agricultor, melhoria à proteção ambiental e aumento da sustentabilidade (REETZ, 2017).

O fertilizante nitrogenado mais empregado no Brasil e no mundo é a ureia (U) (IFA, 2017). Esse fertilizante se destaca devido à sua elevada concentração em N, menor custo e facilidade de produção que, por outro lado, reduz o custo de transporte além de possuir alta solubilidade, facilidade de mistura com outras fontes de nutrientes e disponibilidade imediata de N às plantas (LARA CABEZAS; KORNDORFER; MOTTA, 1997; KISS; SIMIHÃIAN, 2002). Em contrapartida, a U apresenta desvantagens relacionadas com as possibilidades de perdas de N por volatilização de NH_3 (LARA CABEZAS; KORNDORFER; MOTTA, 1997; OTTO et al., 2017), lixiviação de NO_3^- (ANDRASKI; BUNDY; BRYE, 2000; HONG et al., 2007) e desnitrificação (HAO et al., 2001; DUSENBURY et al., 2008), podendo também ocorrer imobilização de N pelos microrganismos do solo, reduzindo a EUN pelas culturas

agrícolas (VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017). Quando aplicada ao solo, a U é rapidamente hidrolisada convertendo R-NH₂ em NH₄⁺ pela ação da enzima urease [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{CO}_3$]. A hidrólise da U consome íons H⁺ elevando o pH ao redor dos grânulos entre 6,5 e 8,8, resultando em possíveis perdas de N por volatilização de NH₃ mesmo em solos ácidos, principalmente, quando aplicada na superfície do solo (CANTARELLA, 2007). As perdas por volatilização de NH₃ podem ser minimizadas com a aplicação da U de forma incorporada, porém a incorporação mecânica é uma operação demorada e onerosa (TRIVELIN et al., 2002). Em uma recente revisão sobre as perdas por volatilização de NH₃ por fertilizantes nitrogenados sintéticos em solos agrícolas, Pan et al. (2016) encontraram que até 64% do N aplicado é perdido devido à volatilização de NH₃, sendo uma das principais razões para a baixa EUN dos fertilizantes nitrogenados, como a U. Porém, os autores afirmaram que é possível mitigar essas perdas em até 88% (fertilizantes não uréicos) com a adoção de estratégias e práticas de manejo adequadas. Assim, o desenvolvimento de novas tecnologias para fertilizantes nitrogenados, visando reduzir as perdas de N é extremamente importante.

A adoção de fertilizantes nitrogenados considerados de eficiência aumentada é uma alternativa para melhorar a EUN. Timilsena et al. (2015) e Snyder (2017) definem os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada como fertilizantes nitrogenados formulados com revestimentos poliméricos, ou com adição de inibidores de urease e/ou nitrificação, ou aqueles com características que lhes conferem melhor resposta agrônômica de tal forma que a disponibilidade de nutrientes permaneça durante todo o ciclo da cultura, de modo que a perda de nutriente através da lixiviação de NO₃⁻, nitrificação e volatilização de NH₃ seja reduzida substancialmente, em comparação a uma referência de fertilizante nitrogenado solúvel em água (ureia convencional). Além disso, os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada podem ajudar a reduzir o estresse osmótico e os problemas com a queima nas raízes e folhas das plantas pela aplicação localizada e concentrada dos fertilizantes convencionais, ajudando a alcançar uma melhor distribuição no crescimento sazonal e melhor aclimação (DAVE et al., 1999; SHAVIV, 2001; TRENKEL et al., 2010). Esses fertilizantes podem ser classificados conforme as tecnologias utilizadas nos processos de produção em: fertilizantes nitrogenados estabilizados (ureia convencional tratada com NBPT, DCD, DMPP, entre outros); fertilizantes nitrogenados de liberação lenta e fertilizantes nitrogenados de liberação controlada (TRENKEL, 2010; AZEEM et al., 2014; TIMILSENA et al., 2014; GUELF, 2017). Assim, diversos estudos conduzidos em diferentes partes do mundo e com várias culturas mostram que, em geral, há efeitos positivos na adoção dos fertilizantes nitrogenados

de eficiência aumentada no rendimento das culturas e na qualidade ambiental (HALVORSON; BARTOLO, 2014). Guo et al. (2017) e Zheng et al. (2017) descreveram tecnologias atuais para fertilizantes nitrogenados com foco em melhorar o rendimento da cultura do milho em comparação à U na China, enquanto que Payne et al. (2015) apresentaram melhorias na EUN nos Estados Unidos da América e González-Villalba (2014), González-Villalba (2018) e Garcia et al. (2018) no Brasil.

No grupo dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada a ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros vem se tornando uma opção de interesse, porém há uma pequena taxa na adoção desse fertilizante para culturas extensivas devido ao seu elevado preço, visto que o custo por unidade de N aplicado é mais elevado (2 a 4 vezes) em comparação à U (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; HALVORSON; BARTOLO, 2014). Esse tipo de fertilizante consiste em uma ureia revestida com uma camada de enxofre elementar (S^0), que é recoberta com uma camada de polímeros (sintético e/ou orgânico) que servem de barreira física semipermeável, reduzindo as saídas por difusão do nutriente para o meio externo, visando atender a demanda da cultura a partir da solubilidade gradual do nutriente (AZEEM et al., 2014; NAZ; SULAIMAN, 2016; GUELF, 2017). Assim, uma alternativa para a redução nos custos de produção agrícola com uso de fertilizantes de eficiência aumentada é a utilização com fertilizantes convencionais na forma de *blends* (PAYNE et al., 2015). A mistura física de grânulos de ureia convencional tratada ou não com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros é considerado um exemplo de *blend*. A ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros demonstrou aumentar o rendimento do milho em cerca de 5 a 11% (GENG et al., 2016; ZHENG et al., 2016). Halvorson; Bartolo (2014) sugeriram que ao utilizar esse tipo de fertilizante para a produção do milho, as doses de N podem ser reduzidas quando comparadas às doses do N aplicado com a U, e ainda fornecer benefícios no rendimento de grãos e lucro econômico, enquanto que González-Villalba (2018) obteve resultados confirmando a possibilidade de redução das doses de N com uso de *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) aplicado de forma incorporada ao solo.

O padrão de liberação do N dos grânulos dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada, em especial o *blend* de U+UREP, depende de vários fatores como a temperatura e umidade do solo, qualidade, densidade e/ou espessura do material polimérico utilizado no revestimento, processo de revestimento dos grânulos dos fertilizantes, entre outros (AZEEM et al., 2014). Na prática, podem ocorrer retardos na liberação do N para o milho por influncia

dos fatores anteriormente citados, afetando a disponibilidade do N para o desenvolvimento das plantas nos primeiros estádios fenológicos (ZHENG et al., 2017), causando problemas na absorção do N e no crescimento das plantas, como relatado por Grant et al. (2012). Os fertilizantes nitrogenados estabilizados, como a ureia convencional tratada com composto inibidor da enzima urease – NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) – é um ótimo exemplo de fertilizante nitrogenado capaz de promover a maior EUN. A ureia convencional tratada com NBPT é altamente solúvel, menos susceptível as perdas de N e é capaz de atender a demanda imediata de N pela cultura. Assim, a mistura física (*blend*) de U+UREP é um exemplo de integração e aproveitamento das tecnologias disponíveis no mercado que podem ser utilizadas para melhorar a EUN na cultura do milho. Teoricamente, a ureia convencional tratada com NBPT é capaz de fornecer o N nos primeiros estádios fenológicos do ciclo da cultura, enquanto que a ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros atenderá a exigência da cultura até o final do ciclo de cultivo devido ao padrão controlado de liberação do nutriente (GONZÁLEZ-VILLALBA, 2014; PAYNE et al., 2015; GUELFI, 2017; GUO et al., 2017; ZHENG et al., 2017). Como comentado anteriormente, a adoção dos *blends* tem o benefício de reduzir o custo do fertilizante e os custos da produção agrícola quando comparado ao uso exclusivo de fertilizantes de liberação controlada (GUELFI, 2017), possibilitando a redução no custo de produção nas indústrias e, portanto, tornando o preço de mercado desses fertilizantes mais acessíveis aos agricultores.

González-Villalba (2014) avaliou a aplicação de várias proporções do *blend* de U+UREP na adubação da cultura do milho no município de Piracicaba, Estado de São Paulo, em que a proporção do fertilizante de liberação controlada no *blend* variou de 50 a 100%, sendo que todo o fertilizante nitrogenado foi aplicado na semeadura do milho. As várias proporções dos *blends* avaliados quando comparados com o tratamento de manejo convencional da cultura do milho (20% do N aplicado na semeadura do milho e 80% do N aplicado em cobertura no estágio fenológico V4 utilizando a U), como recomendado por Raij et al. (1996), forneceram quantidades similares de N mineral ($N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$) nas fases iniciais de crescimento do milho e maiores quantidades nos estádios fenológicos posteriores, além de proporcionar produtividades mais elevadas em relação ao tratamento com a U. O autor concluiu que a utilização dos *blends* na adubação da cultura do milho, mostrou-se eficiente e pode ser considerada uma estratégia para fornecer o N conforme a necessidade da cultura em condição edafoclimática favorável. Posteriormente, González-Villalba (2018) avaliou a aplicação do *blend* de U+UREP, na proporção 30:70, em sistemas de cultivo de milho distintos no Estado de São Paulo, e observou que a incorporação do fertilizante

nitrogenado (*blend*) na semeadura do milho mostrou-se como uma ótima estratégia para evitar perdas massivas do N no sistema solo-planta-atmosfera e mostrou que pode atingir produtividades de grãos semelhantes a U com menores doses de N. Entretanto, Garcia et al. (2018) avaliaram a eficiência da adubação nitrogenada na cultura do milho, comparando a incorporação da U e diferentes proporções do *blend* de U+UREP em uma dose de 180 kg de N ha⁻¹ em dois solos distintos, e observaram que a produtividade de grãos não diferiu do tratamento de manejo convencional.

Trabalhos de pesquisa utilizando fertilizantes de eficiência aumentada, em especial, os fertilizantes nitrogenados de liberação controlada, vêm sendo desenvolvidos em outras partes do mundo. Guo et al. (2017) compararam proporções de um mesmo *blend* de ureia revestida com polímeros (Urea ESN[®] 44-0-0) com a U, utilizando doses distintas de N (180 e 240 kg de N ha⁻¹) em áreas de produção de milho de alto rendimento (> 15 Mg ha⁻¹) na China. Os autores observaram que a aplicação dos *blends* antes da semeadura do milho, em dois anos de cultivo, resultou em menores perdas de N, maior produtividade de grãos e benefício econômico quando comparado à aplicação exclusiva da U. Zheng et al. (2017) relataram aumento de 7 a 10% na produtividade de grãos de milho, maior disponibilidade de N durante os estádios de crescimento e maiores benefícios econômicos na China, utilizando um *blend* de ureia de liberação controlada (não especificado) e ureia convencional, quando comparado ao uso exclusivo de U. Tu (2016) relatou que combinações ideais (*blends*) de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada com a U, podem permitir que as doses de N aplicadas sejam reduzidas em 25% em diversas culturas (com exceção às culturas do algodão e cana-de-açúcar). Entretanto, tais estudos não foram conduzidos para a produção de milho nas condições climáticas observadas no Brasil.

Nesse contexto, a utilização de *blends* de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada com fertilizantes convencionais podem ser uma alternativa para reduzir os custos da produção agrícola, solucionar os problemas com a baixa disponibilidade de N no início do ciclo da cultura do milho, aumentar a produtividade de grãos e a lucratividade ao agricultor. Entretanto, apesar dos trabalhos de pesquisa que vêm sendo desenvolvidos com a cultura do milho nos últimos anos (SEMPEHO et al., 2014; CHALK et al., 2015; SNYDER, 2017), ainda existem muitas dúvidas em relação à adubação nitrogenada, especialmente, quando utilizado fertilizantes de liberação controlada em condição de clima tropical em sistemas de cultivos distintos. Sendo assim, as hipóteses desse trabalho foram: (1) o *blend* de U+UREP é mais eficiente que os fertilizantes nitrogenados convencionais (U e NA) se aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho em um sistema de sucessão cana-de-

açúcar/milho, além disso, o fertilizante de eficiência aumentada (*blend*) promove maior lucratividade em comparação aos fertilizantes nitrogenados convencionais; (2) o modo de aplicação do *blend* na cultura do milho em solo coberto por palha de cana-de-açúcar interfere na produção de biomassa seca, acúmulo de N, produtividade de grãos e no custo e rentabilidade da atividade para o produtor; (3) a aplicação do *blend* de U+UREP em solo com palha de *Brachiaria ruziziensis*, quando comparado com os fertilizantes nitrogenados convencionais (U e NA), reduz as perdas por volatilização de NH₃, além de aumentar a EUN e a produtividade de grãos.

Para testar as hipóteses formuladas, o presente estudo teve como objetivos: (1) avaliar o manejo da adubação nitrogenada em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho com *blend* de U+UREP, comparados com fertilizantes nitrogenados convencionais (U e NA), além de avaliar a viabilidade econômica do custo da adubação nitrogenada e a margem de lucratividade nesse sistema de manejo; (2) avaliar os modos de aplicação e doses de N utilizando *blend* de U+UREP no mesmo sistema de cultivo anteriormente citado, além de avaliar o custo e a rentabilidade desse manejo; (3) avaliar o destino do N-fertilizante de eficiência aumentada em diferentes órgãos de plantas de milho, além de avaliar a volatilização de NH₃ e outros parâmetros de crescimentos da planta quando comparados com a U e o NA em um sistema de sucessão *Brachiaria ruziziensis*/milho.

REFERÊNCIAS

- ANDRASKI, T. W.; BUNDY, L. G.; BRYE, K. R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching. **Journal of Environmental Quality**, v. 29, n. 4, p. 1095-1103, 2000.
- AZEEM, B.; KUSHAARI, K.; MAN, Z. B.; BASIT, A.; THANH, T. H. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, n. 181, p. 11-21, 2014.
- CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 376-449.
- CHALK, P. M.; CRASWELL, E. T.; POLIDORO, J. C.; CHEN, D. Fate and efficiency of ¹⁵N-labelled slow- and controlled-release fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 2, p. 167-178, 2015.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, v. 102, p. 267-322, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos** - safra 2017/18 - Sétimo Levantamento: Brasília: CONAB, 2018, 139p.

DAVE, A. M.; MEHTA, M. H.; AMINABHAVI, T. M.; KULKARNI, A. R.; SOPPIMATH, K. S. A review on controlled release of nitrogen fertilizers through polymeric membrane devices. **Polymer-Plastics Technology Engineering**, v. 38, n. 4, p. 675-711, 1999.

DUSENBURY, M. P.; ENGEL, R. E.; MILLER, P. R.; LEMKE, R. L.; WALLANDER, R. Nitrous oxide emissions from a Northern Great Plains soil as influenced by nitrogen management and cropping system. **Journal of Environmental Quality**, v. 37, n. 2, p. 542-550, 2008.

ERISMAN, J. W.; SUTTON, M. A.; GALLOWAY, J.; KLIMONT, Z.; WINIWARTER, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 636-639, 2008.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The food and agriculture organization corporate statistical base**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/eng/>>. Acesso em: 02 out. 2018.

FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Safra mundial de milho**. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 02 out. 2018.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; OESTE, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDI, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, p. 337-342, 2011.

GALLOWAY, J. N.; TOWNSEND, A. R.; ERISMAN, J. W.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; FRENEY, J. R.; MARTINELLI, L. A.; SEITZINGER, S. P.; SUTTON, M. A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. **Science**, v. 320, n. 5878, p. 889-892, 2008.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GENG, J.; CHEN, J.; SUN, Y.; ZHENG, W.; TIAN, X.; YANG, Y.; LI, C.; ZHANG, M. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1666-1673, 2016.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GRANT, C. A.; WU, R.; SELLES, F.; HARKER, K. N.; CLAYTON, G. W.; BITTMAN, S.; ZEBARTH, B. J.; LUPWAYI, N. Z. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding. **Field Crops Research**, v. 127, p. 170-180, 2012.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15 \text{ Mg ha}^{-1}$) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

HALVORSON, A. D.; BARTOLO, M. E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 681-693, 2014.

HAO, X.; CHANG, C.; CAREFOOT, J. M.; JANZEN, H. H.; ELLERT, B. H. Nitrous oxide emissions from an irrigated soil as affected by fertilizer and straw management. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, n. 1-3, p. 1-8, 2001.

HONG, N.; SCHARF, P. C.; DAVIS, J. G.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A. Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate. **Journal of Environmental Quality**, v. 36, n. 2, p. 354-362, 2007.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION (Paris, França). **Assessment of fertilizer use by crop at the global level**. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org>>. Acesso em: 02 out. 2018.

KISS, S.; SIMIHĂIAN, M. Inorganic compounds tested for evaluation of their inhibiting effect on soil urease activity, urea hydrolysis, ammonia volatilization, and nitrous oxide emission. **Improving efficiency of urea fertilizer by inhibition of soil urease activity**. The Netherlands: Klumer Academic Publishers, 2002. p. 42.

LADHA, J. K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T. J.; SIX, J.; van KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, v. 87, p. 85-156, 2005.

LADHA, J. K.; TIROL-PADRE, A.; REDDY, C. K.; CASSMAN, K. G.; VERMA, S.; POWLSON, D. S.; VAN KESSEL, C.; RICHTER, D. B.; CHAKRABORTY, D.; PATHAK, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. **Scientific Reports**, v. 6, n. 19335, 2016.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH_3 na cultura do milho: I efeito da irrigação e substituição parcial da UR por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 481-487, 1997.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 450-461, 2013.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, n. 225, p. 109-120, 2016.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Ciência Rural**, v. 48, n. 3, p. 413-418, 2017.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283-289, 2016.

PAYNE, K. M.; HANCOCK, D. W.; CABRERA, M. L.; LACY, R. C.; KISSEL, D. E. Blending Polymer-Coated nitrogen fertilizer improved Bermuda grass forage production. **Crop Science**, v. 55, n. 6, p. 2918-2928, 2015.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim técnico 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto agrônômico FUNDAG, 1996. 285p.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), 2017. 178p.

SEMPEHO, S. I.; KIM, H T.; MUDOFU, E.; HILONGA, A. Meticulous Overview on the Controlled Release Fertilizers. **Advances in Chemistry**, v. 2014, p. 1-16, 2014.

SHAVIV, A. Advances in controlled release of fertilizers. **Advances in Agronomy**, v. 71, p. 1-49, 2001.

SNYDER, C. S. Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the “4R” concept to optimise crop production and minimise environmental losses. **Soil Research**, v. 55, n. 6, p. 463-472, 2017.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2014.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2015.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

TU, S. A summary report: responses of different crops to controlled release urea in China. In: THE 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON SLOW AND CONTROLLED-RELEASE AND STABILIZED FERTILIZERS, 2016, Beijing. **Proceedings...**Beijing: New Ag International, 2016.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **National agricultural statistics service reports by year**. Disponível em: <
https://www.nass.usda.gov/Publications/Reports_By_Date/>. Acesso em: 02 out. 2018.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha da cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da biomassa inicial e da adição de vinhaça à superfície do solo. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 135-144, 2017.

ZAVASCHI, E. **Volatilização de amônia e produtividade do milho em função da aplicação de ureia revestida com polímeros**. 2010. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

ZHENG, W.; SUI, C.; LIU, Z.; GENG, J.; TIAN, X.; YANG, X.; LI, C.; ZHANG, M. Long-Term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1703-1716, 2016.

ZHENG, W.; LIU, Z.; ZHANG, M.; SHI, Y.; ZHU, Q.; SUN, Y.; ZHOU, H.; LI, C.; YANG, Y.; GENG, J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. **Field Crops Research**, v. 205, p. 106-115, 2017.

2. FONTES E DOSES DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O uso de fertilizantes de liberação controlada podem ser uma alternativa para reduzir as perdas de nitrogênio (N) no cultivo do milho, podendo-se por esse meio sincronizar a disponibilidade do N no solo às exigências nutricionais da cultura. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o efeito de doses de N e de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho, em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. Dois experimentos foram conduzidos nas safras 2015/16 e 2016/17 em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses de N, em superfície e sobre a cobertura de palha de cana-de-açúcar, a saber: 75, 150, 225 e 300 kg de N ha⁻¹, utilizando-se três fertilizantes nitrogenados: ureia convencional, nitrato de amônio e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros, além de um tratamento controle (sem fertilização com N). Na dose de 225 kg de N ha⁻¹ foram avaliados a produção de biomassa seca (BS), o acúmulo de N e a disponibilidade do N mineral no solo, em cinco estádios fenológicos do milho (V4, V14, VT, R3 e R6). Em todos os tratamentos avaliou-se no estágio R6: a produtividade de grãos e a eficiência de uso do N por meio da eficiência agrônômica e da eficiência de uso interno do N. Os resultados foram submetidos à análise de variância aplicando-se o teste F ($p \leq 0,1$), sendo as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Fischer ($p \leq 0,1$), e usou-se da análise de regressão polinomial para os resultados de produtividade de grãos. Nas condições de cultivo, não houve diferenças na produção de BS e no acúmulo de N no fim do ciclo da cultura com a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Foi observado uma baixa produtividade de grãos que pode estar associado as condições climáticas (intensidade e distribuição das chuvas) e às perdas em que o N está susceptível no sistema de cultivo.

Palavras-chave: Ureia; Nitrato de amônio; Fertilizantes de liberação controlada; Imobilização; Volatilização

ABSTRACT

The use of controlled release fertilizers may be an alternative to reduce nitrogen (N) losses in maize cultivation, and it is possible to synchronize the N availability in the soil to the nutritional requirements of the crop. In this context, the objective of this study was to evaluate the effect of nitrogen and nitrogen fertilizer rates applied in the corn phenolic stage V4 in a sugarcane/maize succession system. Two experiments were conducted in the 2015/16 and 2016/17 crops in a randomized complete block design, with four replications. The treatments consisted of the application of four doses of N, on the surface and on the coverage of sugarcane straw, namely: 75, 150, 225 and 300 kg of N ha⁻¹, using three nitrogen fertilizers: conventional urea, ammonium nitrate and blend of conventional urea treated with NBPT and urea coated with elemental sulfur (S⁰) and polymers, as well as a control treatment (without fertilization with N). The dry biomass (DB), the accumulation of N and the availability of mineral N in the soil were evaluated at 225 kg of N ha⁻¹ in five maize phenological stages (V4, V14, VT, R3 and R6). All treatments were evaluated at the R6 stage: grain yield and N use efficiency through agronomic efficiency and internal N efficiency. The results were submitted to analysis of variance by applying the F test ($p \leq 0.1$), the means of the treatments

being compared by the Fischer test ($p \leq 0.1$), and the polynomial regression analysis was used for the grain yield results. Under cultivation conditions, there were no differences in DB production and N accumulation at the end of the crop cycle with nitrogen fertilizer application. It was observed a low grain yield that may be associated with climatic conditions (intensity and distribution of rainfall) and losses in which N is susceptible in the cropping system.

Keywords: Urea; Ammonium nitrate; Controlled release fertilizers; Immobilization; Volatilization

2.1 INTRODUÇÃO

O N é o nutriente exigido em maior quantidade pelo milho, sendo o que mais limita a produtividade de grãos devido às variadas transformações por que passa no solo, elevando o custo de produção em decorrência da necessidade da aplicação de fertilizantes nitrogenados e da dose de N requerida (LADHA et al., 2016). A produtividade média brasileira é muito baixa, e uma das razões para isso seria a quantidade utilizada do nutriente, em média de 40 kg de N ha⁻¹ (IFA, 2017). Dessa forma, o manejo do N têm sido uma das práticas agrícolas mais estudadas no sentido de melhorar a eficiência de uso do N, sendo que os fertilizantes nitrogenados e as formas de adubação podem influenciar o aproveitamento do nutriente pela cultura. O desafio desse manejo está em aumentar a quantidade do N absorvido pelas plantas e diminuir o potencial de perdas do nutriente (KANEKO et al., 2015).

No sistema solo-planta o N é encontrado predominantemente em formas orgânicas, representando 95% do N-total do solo (NGUYEN; SHINDO, 2011). A disponibilidade do N no solo é controlada basicamente pela mineralização do N-orgânico e pela adição de fertilizantes nitrogenados (OSTERHOLZ et al., 2017). Quando utilizadas culturas em sucessão e/ou rotação, com alta relação C:N nos resíduos vegetais, aliado a incorporação dos mesmos, a decomposição e a mineralização se tornam processos mais lentos e é de se esperar que ocorra imobilização do N, necessitando maior tempo para a ciclagem do nutriente (VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017). Apenas uma pequena parte do N-total do solo de cerca de 5% apresenta-se como formas inorgânicas de N, como nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺), que estão prontamente disponíveis às plantas e que são originados da mineralização por meio de hidrólise enzimática, sendo essas enzimas liberadas no solo por meio da microbiota (NGUYEN; SHINDO, 2011).

O N é absorvido durante todo o ciclo da cultura do milho, porém o fornecimento adequado do nutriente a partir do estágio fenológico com quatro folhas expandidas (V4) é fundamental, uma vez que nesse estágio ocorre o início do processo de diferenciação floral, o

qual origina os primórdios da panícula e da espiga, bem como define o potencial de produção da cultura (SANGOI; ERNANI; SILVA, 2007). O suprimento insuficiente de N nessa fase vegetativa pode reduzir a diferenciação do número de óvulos nos primórdios da espiga e prejudicar o desenvolvimento da espiga na planta, afetando negativamente a produtividade de grãos de milho. O suprimento de N nesse estágio inicial implica na disponibilidade de pelo menos 30 kg de N ha⁻¹ de forma a não limitar os eventos fisiológicos anteriormente citados (FANCELLI, 1997). Portanto, a produtividade de milho está diretamente associada com a atividade metabólica do N, exercendo um papel direto na produção de biomassa e no aumento da produção de grãos (SILVA et al., 2017).

Com relação a época da adubação nitrogenada, é comum a aplicação de parte do N recomendado no plantio, incorporado na semeadura, e o restante em cobertura, sem incorporação, quando as plantas apresentam de quatro a oito folhas expandidas (PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004). O parcelamento da adubação nitrogenada proporciona maior aproveitamento na absorção e assimilação do nutriente pela planta, podendo diminuir o efeito da imobilização do N pelos microrganismos do solo ao decomporem resíduos culturais de alta relação C:N (ALIJANI; BAHRANI; KAZEMEINE, 2013). No Brasil, para o Estado de São Paulo, a recomendação é de 30 kg de N ha⁻¹ no plantio e quase a totalidade do N em duas coberturas aos 30 e 45 dias após a emergência das plantas, em função das transformações do N no solo que podem possibilitar perdas por imobilização, lixiviação, desnitrificação e volatilização de amônia (NH₃) (RAIJ et al., 1996; YAMADA; ABDALLA, 2000).

O fertilizante nitrogenado mais empregado no Brasil e no mundo é a ureia (U) (IFA, 2017), destacando-se devido à sua elevada concentração em N, menor custo e facilidade de produção que, por outro lado, reduz o custo de transporte além de possuir alta solubilidade e facilidade de mistura com outras fontes de nutrientes. No entanto, a U possui susceptibilidade às perdas por volatilização de NH₃ (FRAZÃO et al., 2014; OTTO et al., 2017). Uma alternativa seria a utilização do nitrato de amônio (NA), porém há restrições quanto a sua comercialização e ao preço desse fertilizante. Dessa forma, os fertilizantes tecnologicamente aperfeiçoados, denominados de fertilizantes de eficiência aumentada podem ser uma opção, e são classificados conforme as tecnologias utilizadas nos processos de produção em: i) fertilizantes nitrogenados estabilizados; ii) fertilizantes de liberação lenta; iii) fertilizantes de liberação controlada. Na categoria dos fertilizantes de liberação controlada, geralmente, os grânulos desses fertilizantes possuem alta solubilidade em água e são recobertos com polímeros sintéticos e/ou orgânicos que servem como barreira física semipermeável, reduzindo as saídas do nutriente por difusão para o meio externo (NAZ; SULAIMAN, 2016).

Um dos fatores limitantes do uso desse fertilizante é o seu elevado preço de mercado (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; HALVORSON; BARTOLO, 2014).

Uma alternativa para a redução nos custos da produção agrícola com uso dos fertilizantes de eficiência aumentada, é a utilização com fertilizantes convencionais na forma de *blends* (PAYNE et al., 2015). A mistura física de grânulos de ureia convencional tratada ou não com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros é considerado um exemplo de *blend* (GUELFÍ et al., 2017). Dessa forma, pesquisas comparando ureia revestida com diferentes polímeros (URP) e/ou *blends* com a U tem apresentado resultados inconsistentes em diferentes sistemas de cultivo. Enquanto alguns apontam vantagens no uso da URP, na cultura de cereais (NASH; NELSON, MOTOVALLI, 2013; SHAO; NING; ZHENG, 2013; ZHAO et al., 2013), outros apontam ineficiência, quando comparada com a U (CIVARDI et al. 2011; QUEIROZ et al., 2011; HALVORSON; DEL GROSSO, 2013; MAESTRELO et al., 2014; ALMEIDA et al., 2014; VALDERRAMA et al., 2014). Nesse contexto, objetivou-se avaliar o efeito de doses de N na forma de ureia convencional (U), *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) e nitrato de amônio (NA) aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho, em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização, manejo, tratamentos e delineamento experimental

O estudo foi realizado nas safras agrícolas de 2015/16 e 2016/17 em lavoura de sequeiro no município de Altair e Severínia, Estado de São Paulo, Brasil (20°25'44''S, 49°04'04''W, 531 m de altitude e 20°45'19'S, 48°74'91''W, 523 m de altitude, respectivamente). O clima dos locais é classificado como zona tropical com estação seca de inverno (Aw), segundo Köppen (1948). O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (EMBRAPA, 2013), correspondente a um Typic Eutruxox (SOIL SURVEY STAFF, 2014), o qual apresentava um histórico de aproximadamente 15 anos com cultivo de citros (*Citrus sinensis* L.), antes de ser convertido em um sistema mecanizado de alta produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Anualmente cerca de 10 a 15% da área de produção de cana-de-açúcar é plantada com milho, com o propósito de renovação do canavial. A quantificação de palha de cana-de-açúcar (biomassa seca residual) na área

experimental foi de 17,9 Mg ha⁻¹ (média de amostragens em 1 m² realizadas em cinco pontos aleatórios). A caracterização química e física dos atributos do solo foram realizadas a partir da amostragem de amostras deformadas compostas, nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m (RAIJ, 2011) (Tabela 1).

Tabela 1 – Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/2017.

Características	Profundidade (m)					
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
	Safr 2015/16			Safr 2016/17		
pH CaCl ₂	5,6	5,5	5,0	5,5	5,6	5,6
MO (g dm ⁻³)	5,0	5,0	5,0	16,0	5,0	7,0
P _{resina} (mg dm ⁻³)	31,0	19,0	6,0	46,0	24,0	11,0
K (mmol _c dm ⁻³)	2,0	1,0	1,0	2,0	2,0	1,0
Ca (mmol _c dm ⁻³)	18,0	13,0	10,0	21,0	18,0	20,0
Mg (mmol _c dm ⁻³)	6,0	6,0	7,0	6,0	7,0	10,0
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	18,0	18,0	22,0	18,0	16,0	18,0
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
SB (mmol _c dm ⁻³)	26,0	20,0	18,0	30,0	27,0	31,0
CTC (mmol _c dm ⁻³)	44,0	38,0	40,0	48,0	43,0	49,0
V (%)	59	53	45	62	62	63
m (%)	0,0	0,0	10	0,0	0,0	0,0
S-SO ₄ (mg dm ⁻³)	8,0	14,0	14,0	7,0	8,0	11,0
Cu (mg dm ⁻³)	1,0	0,5	0,3	3,7	1,7	0,9
Fe (mg dm ⁻³)	13,0	9,0	5,0	26,0	9,0	6,0
Zn (mg dm ⁻³)	0,9	0,4	0,2	1,5	0,6	0,3
Mn (mg dm ⁻³)	3,1	2,9	2,4	19,6	16,0	9,0
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3
Argila (%)	18	19	20	18	20	33
Silte (%)	1	4	3	2	1	2
Areia (%)	81	77	77	80	79	65

MO: matéria orgânica (colorimétrica); P_{resina}: fósforo (método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons); K: potássio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica); Ca e Mg: cálcio e magnésio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica); H+Al: acidez potencial (extraído com tampão SMP); Al: alumínio trocável (método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; V%: saturação por bases; Cu, Fe, Zn e Mn: cobre, ferro, zinco e manganês (extraído com DTPA); B: boro (extraído com água quente).

O preparo do solo ocorreu, aproximadamente, dois meses antes da semeadura do milho. A calagem foi realizada na superfície do solo, sem incorporação, visando elevar a saturação por bases para 70% (RAIJ, 2011). A adubação potássica contou com 120 kg de K_2O ha^{-1} na forma de cloreto de potássio aplicada três dias antes da semeadura do milho. A adubação de semeadura foi realizada com a aplicação de 60 kg de N ha^{-1} na forma de fosfato monoamônico (MAP) e 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} na forma de superfosfato simples, feita simultaneamente à semeadura do milho. Ambos os adubos foram aplicados no sulco de semeadura, aproximadamente 0,07 m abaixo das sementes do milho.

Foi utilizado o híbrido DKB 390 da Dekalb[®], que é caracterizado como um híbrido simples modificado, precoce, com uso para grãos e silagem, recomendado para áreas com manejo altamente tecnológico e de alto investimento. A semente inclui a tecnologia VT Pro 2 Yield Gard[®], que controla os insetos-praga: lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), broca do colmo (*Diatraea saccharalis*) e lagarta da espiga (*Helycoverpa zea*) e a tecnologia RoundupReady[®], que confere resistência à aplicação pós-emergente de herbicidas que contém glifosato como ingrediente ativo (DEKALB, 2017). A semeadura do milho foi realizada nos dias 10 de dezembro de 2015 e 05 de dezembro de 2016, respectivamente, às safras 2015/16 e 2016/17 com auxílio de uma semeadora acoplada a um trator automatizado controlado por GPS, configurada para seis linhas, espaçadas em 0,7 m e regulada para proporcionar uma densidade de 64 mil plantas ha^{-1} .

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC), em um esquema fatorial $(3 \times 4) + 1$ com quatro repetições, totalizando 52 parcelas experimentais. A parcela experimental foi composta por seis linhas de plantas de 20 m de comprimento cada, em que a área útil se constituiu das quatro linhas centrais, de 16 m de comprimento cada, totalizando 44,8 m^2 . Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses totais de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1}), além de um tratamento controle (sem fertilização com N). Os tratamentos foram aplicados em superfície e sobre a cobertura de palha de cana-de-açúcar em uma única aplicação a 0,1 m de distância das linhas das plantas de milho, no estágio V4. Os fertilizantes utilizados como fonte de N foram a ureia convencional (45% de N), nitrato de amônio (32% de N) e um *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (45% de N) e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (39% de N), na proporção 30:70, da marca Producote[®] (Patente Nº: EP 0574541 B1) na qual apresentava tempo de liberação controlada por um período de 90 dias (GOERTZ; TIMMONS; MCVEY, 1992), produzido e comercializado pela Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals com o nome comercial Polyblen[®].

Os tratos culturais foram realizados igualmente nas parcelas experimentais e os dados climáticos durante a condução dos experimentos são apresentados na Figura 1.

2.2.2 Avaliações e análises estatísticas

A produção de biomassa seca (BS) e o acúmulo de N na parte aérea das plantas foram avaliadas em cinco estádios fenológicos do milho na dose de 225 kg de N ha⁻¹. A primeira amostragem foi realizada quando as plantas estavam no estágio fenológico V4 (quatro folhas totalmente expandidas) seguido do estágio V14 (quatorze folhas totalmente expandidas), VT (pendoamento), R3 (grãos leitosos) e R6 (maturação fisiológica), sendo amostradas quatro plantas por parcela experimental. Quando possível, o material vegetal da parte aérea do milho foi separado em amostras de folhas (folhas + pendão + folhas da espiga) (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G). Todo o material foi acondicionado em saco de papel tipo *kraft* e seco em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, até massa constante (BRYSON; MILLS, 2015). Mensurou-se a BS com o auxílio de uma balança de precisão e os resultados expressos em kg ha⁻¹, utilizando no cálculo o número de plantas por hectare do experimento. O material vegetal seco foi triturado em moinho tipo Willey (Modelo TE-650, TECNAL®, Piracicaba, Brasil), homogeneizado, subamostrado e submetido à determinação da concentração de N por micro digestão Kjeldhal (DOUGLAS; RIAZI, SMITH, 1980). A quantidade de N acumulado

Figura 1 – Pluviosidade (mm), temperatura máxima e mínima (°C) durante o ciclo da cultura do milho nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17. Os dados meteorológicos foram obtidos no posto meteorológico da Estação Experimental de Citricultura de Bebedouro (EECB), distante aproximadamente 50 km da área experimental.

em cada parte das plantas foi obtido por meio da multiplicação da concentração de N nos tecidos pela BS de cada parte das plantas e expressado em kg ha^{-1} .

Ao término do ciclo da cultura (estádio R6), foi determinada a produtividade de grãos por meio da colheita mecanizada de cada parcela experimental nos dias 23 de março de 2016 e 29 de março de 2017, respectivamente, às safras 2015/16 e 2016/17. Os grãos foram pesados e os resultados foram expressos com a umidade corrigida para 13%, em Mg ha^{-1} , utilizando no cálculo o número de plantas por hectare do experimento.

Foram calculadas a eficiência de uso do N pelo milho (EUN), por meio da eficiência de uso interna (EUI) (equação 1) e a eficiência agrônômica do N aplicado (EA) (equação 2), seguindo a proposta de Good; Shrawat; Muench (2004) e Dobermann (2007) para a avaliação da eficiência indireta de uso do nutriente.

$$EUI = PGN/NA \text{ ————— (Eq. 1)}$$

$$EA = (PGN - PG0)/DN \text{ ————— (Eq. 2)}$$

Onde: *EUI*: é a eficiência de uso interna pelo milho (kg kg^{-1}); *PGN*: é a produtividade de grãos quando adubado com fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); *NA*: é o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho nos tratamentos que receberam fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); *EA*: é a eficiência agrônômica do N aplicado (kg kg^{-1}); *PGN*: é a produtividade de grãos quando adubado com fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); *PG0*: é a produtividade de grãos nos tratamento controle (kg ha^{-1}); *DN*: é a dose de N aplicada (kg ha^{-1}).

As amostragens de solo para determinação da disponibilidade do N mineral no solo foram realizadas com trado amostrador de solo tipo sonda (Modelo S-60, SONDATERRA®, Piracicaba, Brasil) no local da aplicação dos fertilizantes nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, totalizando três amostras simples por profundidade de solo. A determinação da disponibilidade do N mineral no solo também foi avaliada na dose de $225 \text{ kg de N ha}^{-1}$, por meio de cinco amostragens ao longo do tempo, concomitantemente à amostragem de plantas para determinação da produção de BS e acúmulo de N.

A extração das formas inorgânicas do N no solo foi realizada em uma subamostra de 5 g com base em massa úmida, à qual se adicionou 25 mL de KCl 2 mol L^{-1} (relação solo:solução extrato de 1:5 – m/v) (BURESH; AUSTIN; CRASWELL, 1982). Após agitação por uma hora da mistura de solo com a solução extratora em mesa agitadora horizontal,

filtrou-se a solução, realizando posteriormente a determinação da concentração do N mineral por meio de sistema de análise por injeção de fluxo (Flow injection analysis - FIA). O N- NH_4^+ foi analisado através da formação de NH_3 em um meio alcalino, permeável em membrana hidrofóbica (PTFE), sendo o fluxo direcionado para uma cela de condutividade (REIS et al., 1997). O N- NO_3^- foi determinado por método espectrofotométrico, mediante redução do nitrato a nitrito por coluna de cádmio coperizado, com posterior reação do nitrito com sulfanilamida em meio ácido, formando um azo-composto (GINÉ et al., 1980). Os resultados da disponibilidade do N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) foram corrigidos e expressos em peso de terra seca em estufa, após secagem de subamostras de solo a 105 °C em estufa por 48 h.

Os resultados da produção de BS, acúmulo de N, eficiência de uso do N, produtividade de grãos e disponibilidade do N mineral no solo foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando-se o teste F ($p \leq 0,1$), sendo a significância interpretada por comparação de médias pelo teste de Fischer (LSD) ($p \leq 0,1$). A produtividade de grãos, quando significativa para as doses dos tratamentos, foi avaliada por análise de regressão polinomial de primeiro e segundo grau. Foi realizado o teste de correlação de Pearson ($p \leq 0,1$) entre a disponibilidade do N mineral no solo nas profundidades amostradas e a produtividade de grãos. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o pacote ExpDes (FERREIRA et al., 2013), a partir do programa livre R (R CORE TEAM, 2017).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio na parte aérea das plantas do milho

A significância entre as médias dos tratamentos, proporcionada pelo teste de Fischer, mostrou diferenças ($p \leq 0,1$) na produção de BS nas partes das plantas nos diversos estádios fenológicos do milho em função dos fertilizantes nitrogenados nas duas safras agrícolas (Tabela 2). O aumento na produção de BS ocorreu com o estágio fenológico das plantas de milho, praticamente na mesma proporção entre os fertilizantes nitrogenados, e em menor proporção no tratamento controle.

No estágio V4, que compreende a época da aplicação em cobertura dos fertilizantes nitrogenados, não houve diferença na produção de BS em todos os tratamentos de ambos os anos de cultivo, o que pode indicar que houve disponibilidade do N proveniente do solo para

suprir a demanda mínima da planta até esse estágio fenológico. No estágio V14, em ambas as safras, houve efeito significativo na produção de BS entre os fertilizantes nitrogenados, com exceção ao NA e o tratamento controle.

Nos dois anos de cultivo, durante os estádios VT e R3, houve similaridade na produção de BS em algumas partes das plantas do milho entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle, sugerindo que tanto os fertilizantes convencionais de pronta liberação como a U e o NA, assim como o fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada (*blend* de U+UREP), disponibilizaram N às plantas de milho de forma similar. Pode-se inferir que a alta relação C:N da palha de cana-de-açúcar possa ter imobilizado grande parte do N aplicado (VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017) e/ou a baixa disponibilidade hídrica (Figura 1) possa ter reduzido a produção de biomassa verde e o aproveitamento de N pelas plantas. Os déficits hídricos durante o período vegetativo podem reduzir o crescimento da planta de milho devido à decréscimos da área foliar e da biomassa da planta. Entretanto, quando os déficits hídricos ocorrem nas fases de pré-floração e no início do enchimento de grãos, que é considerado o período crítico da cultura, pode ocasionar em redução no rendimento de grãos (MELO et al., 2018).

Os resultados da produção de BS no estágio fenológico R6 de ambas as safras, não diferiram entre os tratamentos ($p \geq 0,1$), exceção às partes do colmo e sabugo na safra 2015/16. A disponibilidade do N mineral no solo pode ter atendido toda exigência nutricional da cultura, uma vez que, o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular pode ter colaborado para o maior volume de solo explorado, tornando as plantas mais hábeis na absorção do N em profundidade. Simultaneamente, parte do N proveniente da adubação com os fertilizantes nitrogenados pode ter sido imobilizado pelos microrganismos, devido ao baixo potencial de mineralização desse nutriente da palha de cana-de-açúcar. A disponibilização do N imobilizado na palha é considerada baixa, e seu aproveitamento pela cultura do milho, nesse sistema de cultivo, é prejudicado em função do lento processo de mineralização desse resíduo vegetal (VITTI et al., 2007; YAMAGUCHI et al., 2017). A imobilização do N pode diminuir a eficiência da adubação nitrogenada (VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017), reduzindo as respostas das plantas de milho em relação à aplicação em cobertura dos fertilizantes nitrogenados avaliados.

Tabela 2 – Produção de biomassa seca (kg ha⁻¹) de folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho, em função dos fertilizantes nitrogenados, ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), aplicadas em cobertura, nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17.

Fontes nitrogenadas	Estádio fenológico																											
	V4		V14				VT				R3				R6													
	Fração da planta																											
	F	F	C	Total	F	C	Total	F	C	S	G	Total	F	C	S	G	Total											
Safra 2015/16																												
Controle [†]	104	3659	b	2217	b	5876	b	4676	b	2787	c	7463	c	6433	3397	b	2298	b	4067	16195	5704	3313	b	2139	b	9581	20737	
U+UREP	114	4456	a	2938	a	7394	a	6147	a	3460	b	9607	b	7250	4131	a	2754	a	4393	18528	6506	3967	a	2609	a	10444	23526	
U	125	4389	a	3013	a	7402	a	6986	a	4217	a	11203	ab	7217	3964	a	2944	a	5050	19175	6224	3803	a	2468	ab	10305	22800	
NA	110	4111	ab	2600	ab	6711	ab	6746	a	3925	a	10671	ab	7327	4268	a	3093	a	4937	19625	6661	3870	a	2700	a	11847	25078	
<i>p</i> > <i>F</i>	0,110	0,045		0,038		0,040		0,006		<0,001		<0,001		0,130	0,018		0,038		0,141	0,578	0,236	0,017		0,088		0,344	0,217	
C.V. (%)	8	9		13		10		12		7		9		8	8		12		13	8	10	7		11		16	12	
Safra 2016/17																												
Controle	164	3920	c	2337	b	6257	b	4447	b	3047	d	7494	b	5542	b	4090	b	1588	b	6047	17267	b	6124	4593	1771		9563	22051
U+UREP	145	4652	a	2947	a	7599	a	4913	ab	3673	c	8586	ab	6585	ab	5734	a	1661	b	6154	20134	ab	6746	5589	1879		10354	24568
U	182	4567	ab	3022	a	7589	a	5584	a	4368	a	9952	a	7612	a	5565	a	2222	a	8531	23930	a	6941	5938	1619		8944	23442
NA	170	4239	bc	2610	b	6849	b	5054	ab	3879	ab	8933	a	7809	a	5652	a	1922	ab	6999	22382	a	6206	5136	1631		9481	22454
<i>p</i> > <i>F</i>	0,134	<0,001		<0,001		<0,001		0,098		0,002		0,021		0,004	0,003		0,100		0,132	0,013	0,613	0,204		0,880		0,926	0,852	
C.V. (%)	10	7		11		8		16		15		15		17	17		24		27	18	19	23		31		31	23	

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com *p* ≤ 0,1.

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado em cobertura no estágio V4 do milho.

O acúmulo de N apresentou diferenças ($p \leq 0,1$) entre os tratamentos fertilizados com N em cobertura e o tratamento controle nos distintos estádios fenológicos do milho, com exceção ao estágio V4 e a parte do sabugo no estágio R3 e R6 na safra 2015/16. A significância entre as médias dos tratamentos, proporcionada pelo teste de Fischer não mostrou diferenças ($p \geq 0,1$) nos estádios fenológicos do milho para o acúmulo de N na safra 2016/17, com exceção as partes das folhas e colmo no estágio R3 (Tabela 3). O N acumulado ao fim do ciclo da cultura foi maior entre os fertilizantes nitrogenados, especialmente para o NA e o *blend* de U+UREP, em comparação à U e ao tratamento controle na safra 2015/16, enquanto que na safra seguinte os fertilizantes nitrogenados diferiram apenas do tratamento controle.

No estágio V4 não houve diferença no acúmulo de N em todos os tratamentos de ambas as safras, já que os fertilizantes nitrogenados foram aplicados nesse estágio fenológico. Houve aumento no acúmulo de N nas folhas e colmos das plantas desde o estágio inicial até o estágio R3 em todos os tratamentos de ambas as safras, ocorrendo queda no acúmulo nessas frações das plantas de milho devido ao início da translocação do N e carboidratos para a fase de enchimento de grãos (SOUFIZADEH et al., 2018). Na maturidade fisiológica (estágio R6), o acúmulo de N nos grãos (média das duas safras) contribuiu com 59% do N acumulado nas plantas ao final do ciclo da cultura.

Na safra 2016/17, quase não houve distinção no acúmulo de N entre os tratamentos nas partes das plantas nos diversos estádios fenológicos do milho. A hipótese sugerida para explicar esses resultados, como aventado anteriormente, é que a disponibilidade do N mineral no solo tenha sido suficiente para o desenvolvimento da cultura, não ocorrendo diferenças na concentração do N mineral no solo com a aplicação dos distintos fertilizantes nitrogenados, supostamente pelo sistema de cultivo ter possibilitado perdas do nutriente por meio da imobilização do N.

A pluviosidade cinco dias antes da aplicação dos fertilizantes nitrogenados no estágio V4 do milho na safra 2016/17 foi de 55 mm, correspondendo a um valor 91% superior à da safra anterior (Figura 1). A alta umidade proporcionada pela pluviosidade pode ter contribuído para a liberação mais rápida do N prontamente disponível no *blend* de U+UREP, além de favorecer a hidrólise e a solubilização do N na U. Dessa forma, o N se torna mais susceptível às perdas por volatilização de NH_3 , já que a quantidade de palha de cana-de-açúcar pode prejudicar a incorporação do fertilizante ao solo (TRIVELIN et al., 2002). A umidade do solo é um importante fator na hidrólise da U e quanto mais rápida ocorrer, maior o potencial de perdas do N na forma de NH_3 (OTTO et al., 2017). Além disso, o processo de

imobilização de N que ocorre na palha de cana-de-açúcar é favorecido simultaneamente à volatilização de NH_3 , diminuindo às respostas das plantas em relação ao acúmulo de N, em todos os estádios fenológicos e tratamentos avaliados, nessa safra.

Os resultados obtidos foram semelhantes à diversos estudos realizados em regiões tropicais que compararam fertilizantes nitrogenados convencionais com fertilizantes de eficiência aumentada, especialmente os de liberação controlada. Grant et al. (2012) avaliaram o uso de U e URP (Urea ESN[®] 44-0-0) em cinco locais durante três safras de cereais e aferiram que a utilização de ambos os fertilizantes nitrogenados não promoveu diferenças significativas no acúmulo de N pelas plantas no momento da colheita. Resultados semelhantes foram obtidos por Halvorson; Del Grosso (2013) que compararam a U e URP (Urea ESN[®] 44-0-0) em dois modos de aplicação (a lanço e incorporado) e não encontraram variação entre o N absorvido pela biomassa total e os grãos de milho. Garcia et al. (2018) avaliaram a eficiência da adubação nitrogenada comparando a incorporação da U e diferentes proporções do *blend* de U+UREP em uma dose de 180 kg de N ha⁻¹ em um sistema de cultivo distinto, e observaram que o acúmulo de N entre os tratamentos fertilizados com N foi diferente apenas do tratamento controle, assim como observado nesse estudo. Em contrapartida, González-Villalba (2018) avaliando a eficiência de uso do N e a produtividade de grãos em distintos sistemas de cultivo, observou que o acúmulo de N, também, apresentou diferenças somente em relação ao tratamento controle em comparação ao *blend* de U+UREP e a U, quando avaliado nas mesmas condições de cultivo (sucessão cana-de-açúcar/milho). Pelo exposto, a U parece ter o mesmo desempenho agrônômico do *blend* de U+UREP, sendo assim, o uso do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e o fertilizante nitrogenado de liberação controlada não se justificaria pelo maior preço de mercado desses fertilizantes.

Tabela 3 – Nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹) de folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho, em função dos fertilizantes nitrogenados, ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), aplicadas em cobertura, nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17.

Estádio fenológico																															
Fontes nitrogenadas	V4		V14		VT		R3					R6																			
	Fração da planta																														
	F	F	C	Total	F	C	Total	F	C	S	G	Total	F	C	S	G	Total														
Safrá 2015/16																															
Controle†	2,9	57,8	b	13,6	c	71,4	b	91,3	c	13,1	c	104,4	c	123,1	b	16,0	c	18,1	70,3	b	227,5	b	72,0	c	13,8	b	10,4	151,5	c	247,7	b
U+UREP	3,9	103,6	a	27,9	a	131,5	a	147,7	b	19,2	b	166,9	b	155,2	a	19,5	b	20,9	81,4	ab	277,0	a	110,4	a	18,8	a	12,7	192,9	ab	334,8	a
U	4,1	89,8	a	22,7	b	112,5	a	165,0	ab	22,1	b	187,1	ab	165,6	a	17,2	ab	22,2	90,0	a	295,0	a	93,8	b	18,0	a	12,4	163,3	bc	287,5	b
NA	3,5	91,1	a	19,5	b	110,6	a	173,4	a	27,4	a	200,8	a	165,6	a	22,9	a	20,0	92,3	a	300,8	a	100,9	ab	21,7	a	12,7	205,3	a	340,6	a
p > F	0,131	0,010		0,002		0,004		<0,001		<0,001		<0,001		0,025		0,008		0,651	0,047		0,021		0,002		0,024		0,338		0,044		0,011
C.V. (%)	19	17		17		16		13		15		12		12		12		23	12		10		11		16		16		14		11
Safrá 2016/17																															
Controle†	3,2	54,6		13,7		68,2		89,7		17,7		107,5		69,5	b	24,4	c	10,0	106,6		210,5	b	68,9		27,6		11,9		171,8		280,2
U+UREP	4,2	108,2		25,4		133,6		116,8		35,6		152,4		103,2	a	39,6	a	11,4	109,7		263,8	ab	74,9		34,2		11,7		204,2		325,0
U	3,1	93,5		22,8		116,3		104,9		35,1		140,0		107,3	a	33,3	b	14,0	157,6		312,2	b	85,8		36,1		10,0		156,0		288,0
NA	3,6	100,9		19,6		120,5		126,0		32,6		158,6		110,7	a	37,3	ab	13,8	124,4		286,2	b	101,5		27,5		12,1		162,1		303,2
p > F	0,142	0,700		0,304		0,545		0,167		0,727		0,210		0,002		<0,001		0,260	0,146		0,011		0,398		0,775		0,731		0,476		0,443
C.V. (%)	18	9		14		9		16		26		16		23		14		35	31		21		19		22		30		31		24

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com *p* ≤ 0,1.

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado em cobertura no estágio V4 do milho.

2.3.2 Produtividade de grãos e índices de eficiência de uso de N pelo milho

Na média de todos os tratamentos, a produtividade de grãos foi de 7,3 e 6,1 Mg ha⁻¹ nas safras 2015/16 e 2016/17, respectivamente. Na safra 2015/16, não houve diferenças na produtividade de grãos entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle, porém as médias das produtividades em função das doses de N foram ajustadas por modelo linear ($y = 0,0079x + 5,9668$; $R^2 = 0,9548$). Na safra seguinte, a significância da comparação de médias proporcionada pelo teste de Fischer (LSD) não revelou diferenças entre os fertilizantes nitrogenados e as doses de N e o tratamento sem fertilização com N, sendo apresentadas somente as médias dos tratamentos. Os resultados de produtividade de grãos submetidos à análise de variância mostraram que não houve interação entre os fatores estudados, sendo significativos apenas quando cada fator foi analisado isoladamente como já comentado anteriormente (Figura 2).

O grande aporte de palha de cana-de-açúcar (17,9 Mg ha⁻¹) associado às condições climáticas durante a condução do experimento (Figura 1) podem ter favorecido, concomitantemente, a imobilização e a volatilização de NH₃, limitando a eficiência da adubação nitrogenada, causando semelhanças nas produtividades de grãos entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle na safra 2015/16, assim como foi observado para a produção de BS acumulada. A palha de cana-de-açúcar pode ter favorecido as perdas

Figura 2 – Produtividade de grãos (Mg ha⁻¹) avaliada na colheita mecanizada do milho, em função das doses de N dos fertilizantes nitrogenados: ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17. Os símbolos representam os valores observados e as linhas os valores previstos, a partir do estudo da análise de regressão.

de N por volatilização de NH_3 , pois a atividade da enzima urease acaba sendo maior em resíduos de plantas do que no solo (TRIVELIN et al., 2002; MARIANO et al., 2012). Como os fertilizantes nitrogenados foram aplicados sobre a cobertura de palha da cultura antecessora (cana-de-açúcar), as perdas de NH_3 por volatilização podem representar grande variação, e a magnitude dessas perdas é de difícil predição. Estima-se que essas perdas possam variar de 20 a 40% do N aplicado quando a superfície do solo está coberta com esse tipo de resíduo cultural (PRAMMANNE et al., 1989; FRENEY et al., 1994; CANTARELLA et al., 2008; MARIANO et al., 2012).

A menor produtividade de grãos na safra 2016/17 pode estar associada com a intensidade e a distribuição das chuvas, além das perdas em que o N esteve associado. Durante os 115 dias do cultivo do milho, ocorreu uma pluviosidade de 514,4 mm com um período de estresse hídrico entre o pendoamento até o estágio fenológico onde ocorre o início da fase de enchimento de grãos (Figura 1). Guedes et al. (2017) constataram que o estresse hídrico nesse estágio fenológico reduz a produtividade de massa verde e o aproveitamento de N pelas plantas. Zhang et al. (2014) afirmaram que o milho é extremamente sensível ao estresse hídrico, em decorrência da alta transpiração, máxima área foliar e aos processos de formação do zigoto e enchimento dos grãos nesse estágio.

Os resultados de produtividade de grãos são atípicos para a cultura, levando em consideração as altas doses de N avaliadas. As baixas produtividade de grãos observadas em relação às doses de N aplicadas ocorre quando o fator limitante não é a disponibilidade de N, mas qualquer outro fator importante. Amado et al. (2013) avaliando doses de N no plantio de milho durante duas safras agrícolas com diferentes condições climáticas observaram que, quando as chuvas foram suficientes, as respostas às doses de N foram maiores (aumento de $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ em relação ao tratamento controle que produziu $8,6 \text{ Mg ha}^{-1}$). No entanto, durante a safra agrícola com déficit hídrico foi observado um ganho de apenas $1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ com a aplicação das doses de N. Assim, de acordo com os autores, os altos rendimentos de milho e a maior resposta às doses de N estão associados à disponibilidade de água no solo e aos índices pluviométricos (intensidade e distribuição das chuvas). A restrição hídrica também é citada como possível fator limitante para a resposta do milho à adubação nitrogenada por Casagrande e Fornasier Filho (2002), Soratto et al. (2010) e Goes et al. (2012), que obtiveram rendimentos máximos de $5,2$, $4,9$ e $7,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente, demonstrando limitação na produtividade de grãos, mesmo com a aplicação de N via fertilizantes.

De modo semelhante a esse estudo, trabalhos em condições tropicais realizados por Civardi et al. (2011), Queiroz et al. (2011), Almeida et al. (2014), Maestrelo et al. (2014),

Martins; Cazetta; Fukuda (2014) e Valderrama et al. (2014) demonstraram que a ureia revestida por diversos tipos de polímeros não apresentou a eficiência esperada, tendo a produtividade de grãos semelhante à obtida com a U ou até se igualando ao tratamento controle. Os estudos foram desenvolvidos em condições climáticas, tipos de solos e sistemas de cultivo distintos, dificultando a previsão de resposta da cultura do milho à aplicação de N. Além disso, os resultados obtidos com a utilização de URP podem variar conforme a época e o modo de aplicação do fertilizante (MAESTRELO et al., 2014).

A eficácia dos fertilizantes nitrogenados convencionais como a U e o NA são dependentes da temperatura do solo, conteúdo de água, pH no solo, velocidade do vento e a própria concentração dos fertilizantes nitrogenados no solo. Da mesma forma, a taxa de liberação do N nos fertilizantes revestidos com polímeros, também estão associados a esses fatores, em especial a temperatura do solo, uma vez que esses fatores, podem aumentar a permeabilidade e a taxa de difusão do nutriente presente no interior dos grânulos desses fertilizantes (CHITOLINA, 1994; GUELF, 2017). Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de novos polímeros para revestir os grânulos de U e que se adaptam ao clima tropical e as condições climáticas do Brasil, com o intuito de melhorar a eficiência de uso do N nesses fertilizantes e aumentar a produtividade de grãos de milho. Mais estudos avaliando fontes, doses e modos de aplicação dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada devem ser realizados sob as mesmas condições desse estudo, pois são inexistentes os trabalhos que avaliam a resposta do milho à adubação nitrogenada em um sistema de sucessão com aporte de palha de cana-de-açúcar.

Os índices de eficiência de uso do N são apresentados na Figura 3. Os resultados da EUI foram em média de 24,5 e 20,7 kg de N convertidos para cada kg de grãos produzidos nas safras 2015/16 e 2016/17, respectivamente, com maior valor apenas para o NA, na segunda safra. Os resultados da EA foram em média de 8,1 e 5,2 kg de grãos produzidos para cada kg de N aplicado, indicando queda de 36% em relação a primeira safra. Na safra 2015/16, a EA do NA não diferiu do *blend* de U+UREP, diferindo-se apenas da U.

Figura 3 – Eficiência de uso interna de nitrogênio (EUI) e eficiência agrônômica (EA) do milho, em função dos fertilizantes nitrogenadas, ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), e doses de N, nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17.

Segundo Xu; Fan; Miller (2012) a EUI do N pelas plantas é complexa e dependente de diversos fatores como a absorção, translocação, assimilação e remobilização do N que estão associados a fatores genéticos e ambientais. Os resultados da EUI podem apresentar variações de 30 a 90 kg kg⁻¹, sendo que uma faixa de 55 a 65 kg kg⁻¹ é considerada adequada para proporcionar altas produtividades (DOBERMANN, 2007). Os resultados da EUI obtidos mostram a baixa eficiência da adubação nitrogenada em ambos os anos de cultivo. De acordo com Dobermann (2007), a EA pode variar de 10 a 30 kg kg⁻¹ em sistemas bem manejados e ultrapassar valores de 25 kg kg⁻¹ em solos com baixa disponibilidade de N. Os resultados da EA podem corroborar com a suposição de que a disponibilidade do N mineral no solo tenha sido suficiente para atender as exigências nutricionais da cultura, devido a semelhança nos resultados da produtividade de grãos e pelo baixo índice de EUI do N a partir da adubação nitrogenada.

2.3.3 Disponibilidade do N mineral no solo ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$)

A disponibilidade do N mineral no solo na semeadura e no estágio V4, em ambas as safras, não foram submetidas à análise de variância, pois as variações do N-inorgânico não seriam atribuídas aos tratamentos, já que os fertilizantes nitrogenados foram aplicados nesse estágio (Figura 4 e 5). Embora as concentrações médias do N mineral no solo nos estádios fenológicos tenham sido quantitativamente menores na safra 2015/16 em relação à safra

seguinte, de modo geral, houve diferenças ($p \geq 0,1$) entre os tratamentos, com exceção ao estágio VT e R3 nas profundidades de 0,4-0,6 e 0-0,2, 0,2-0,4 m, respectivamente (Tabela 4). Entretanto, na safra 2016/17 houve diferenças apenas no estágio R3 para as profundidades de 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, sendo que o *blend* de U+UREP obteve os menores valores de N mineral.

Figura 4 – Concentrações médias de N mineral no solo ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) em diferentes profundidades e estádios fenológicos do milho nos tratamentos com ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), na safra agrícola 2015/16.

Figura 5 – Concentrações médias de N mineral no solo ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) em diferentes profundidades e estádios fenológicos do milho nos tratamentos com ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), na safra agrícola 2016/17.

Tabela 4 – Concentrações médias de N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) em diferentes profundidades e estádios fenológicos do milho nos tratamentos com ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17.

Tratamentos	Estádio fenológico							
	V14	VT	R3	R6	V14	VT	R3	R6
	Safrá agrícola							
	2015 / 16				2016 / 17			
	----- N-NO ₃ ⁻ + N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹) -----							
	<u>0-0,2 m</u>							
Controle [†]	3,5	4,1 b	3,7	3,4	10,8	12,8	6,3	7,4
U+UREP	6,1	5,9 a	3,8	4,0	10,9	12,9	6,3	7,3
U	3,6	3,9 b	3,5	2,5	11,6	13,6	6,2	7,3
NA	2,8	4,3 b	4,4	3,5	10,7	12,7	6,7	7,1
<i>p</i> > F	0,189	0,007	0,257	0,931	0,378	0,388	0,292	0,289
	<u>0,2-0,4 m</u>							
Controle	2,1 b	4,0 b	2,6	1,5 b	8,8	9,8	6,4 bc	7,3
U+UREP	6,3 a	5,0 a	3,0	4,4 a	9,5	8,5	6,1 c	7,6
U	2,7 b	4,0 b	3,8	0,7 b	9,9	8,9	6,9 a	7,3
NA	3,2 b	4,7 ab	3,0	1,3 b	9,2	8,2	6,8 ab	7,4
<i>p</i> > F	0,001	0,096	0,582	0,023	0,327	0,160	0,011	0,302
	<u>0,4-0,6 m</u>							
Controle	2,3 b	3,1	1,9 b	1,3 ab	8,6	7,6 b	6,5 b	5,3
U+UREP	4,3 a	3,9	3,4 ab	1,9 a	8,7	7,7 b	6,5 c	6,0
U	2,2 b	2,8	2,2 b	1,1 b	8,8	7,8 b	6,8 a	6,6
NA	2,7 b	3,4	4,7 a	0,9 b	8,3	9,3 a	6,6 ab	6,6
<i>p</i> > F	0,062	0,613	0,931	0,099	0,295	0,010	0,017	0,405

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado.

Os resultados das concentrações médias do N mineral no solo vão ao encontro das suposições levantadas nesse estudo, de que possa ter ocorrido perdas de N no sistema solo-planta-atmosfera por imobilização e/ou volatilização de NH_3 , além de indicar que a disponibilidade do N mineral no solo foram semelhantes na maioria dos tratamentos avaliados, principalmente na camada 0-0,2 m, durante todo o ciclo da cultura (Tabela 4). A presença de palha de cana-de-açúcar pode ter contribuído para as mudanças e transformações do N no sistema de cultivo, dificultando a comparação de respostas entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle. Yamaguchi et al. (2017) afirmaram que a quantidade de palha de cana-de-açúcar remanescente no solo da colheita do cultivo anterior prejudica o processo de decomposição desse resíduo cultural, pois mantém a umidade do solo favorecendo à atividade microbiana, regulando parcialmente a quantidade de N imobilizado pelos microrganismos. Além disso, a umidade do solo proporcionada pela palha, pode, também, influenciar positivamente na hidrólise da U resultando na perda de N por

volatilização de NH_3 (TRIVELIN et al., 2002, MARIANO et al., 2012; OTTO et al., 2017), além de aumentar a difusão do nutriente no interior dos grânulos do *blend* de U+UREP para o meio de cultivo.

Os resultados da disponibilidade do N mineral no solo podem ser úteis para explicar os resultados de acúmulo de N pelas plantas e a produtividade de grãos na cultura do milho. As diferenças na produtividade de grãos de uma safra para outra (Figura 2) podem não estar relacionadas às concentrações médias de N mineral no solo, já que quase não houve diferenças entre as concentrações de N mineral com a aplicação dos fertilizantes nitrogenados na safra 2016/17 (Tabela 4). Pode-se inferir que a ausência de resposta no acúmulo de N e na produtividade de grãos entre os tratamentos nessa safra, não se deva ao solo por ter atendido a exigência nutricional das plantas de milho, mas, provavelmente, aos processos envolvendo as transformações e perdas de N no sistema de cultivo e/ou a disponibilidade de água no solo (condições climáticas).

Os coeficientes da correlação de Pearson entre as concentrações médias de N mineral no solo, nos diferentes estádios fenológicos do milho, e a produtividade de grãos são apresentados na Tabela 5. As concentrações de N mineral no solo não são correlatas com a produtividade de grãos, praticamente para todas as profundidades de solo e estádios fenológicos avaliados nesse sistema de cultivo. Em sistemas de cultivo em que a imobilização e a volatilização de NH_3 possa ocorrer juntamente com condições climáticas desfavoráveis (estresse hídrico), a resposta das plantas à adição de fertilizantes nitrogenados pode ficar comprometida por esses processos. Sendo assim, as condições climáticas (intensidade e distribuição das chuvas) e o próprio sistema de cultivo podem ter contribuído para uma menor produção de BS e produtividade de grãos, além de possibilitar que o N fique susceptível às perdas no sistema. Assim, as perdas de N juntamente com o regime hídrico se tornam variáveis importantes, dificultando a comparação de respostas entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle por diminuir a eficiência da adubação nitrogenada, como demonstrado na Figura 3.

Tabela 5 – Coeficientes da correlação de Pearson (r) entre as concentrações médias de nitrogênio mineral ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) nas profundidades 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m nos estádios fenológicos V14, VT, R3 e R6 da cultura do milho e a produtividade de grãos.

Camada (m)	Estádio fenológico			
	V14	VT	R3	R6
<u>Safra 2015/16</u>				
0-0,2	0,19 ^{NS}	0,39 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,12 ^{NS}
0,2-0,4	0,48 [†]	0,32 ^{NS}	0,14 ^{NS}	0,19 ^{NS}
0,4-0,6	0,25 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,33 ^{NS}	0,22 ^{NS}
<u>Safra 2016/17</u>				
0-0,2	0,21 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,35 ^{NS}	0,47 [†]
0,2-0,4	0,46 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,08 ^{NS}	0,00 ^{NS}
0,4-0,6	0,22 ^{NS}	0,65 [‡]	0,04 ^{NS}	0,21 ^{NS}

[†] indica efeito significativo com $p \leq 0,1$.

[‡] indica efeito significativo com $p \leq 0,05$.

^{NS} indica ausência de efeito significativo com $p \leq 0,1$.

2.4 CONCLUSÕES

1. A conversão de um sistema de cultivo de cana-de-açúcar para milho com alto aporte de palha da cultura antecessora tem influência marcante nas transformações do nitrogênio, como a imobilização e a volatilização de amônia.
2. A produção de biomassa seca e o acúmulo de N foram pouco influenciados ao fim do ciclo da cultura entre os fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura no estágio V4 do milho.
3. As condições climáticas (intensidade e distribuição das chuvas) se apresentaram como um fator limitante para o rendimento da cultura.

REFERÊNCIAS

ALIJANI, K.; BAHRANI, M. J.; KAZEMEINE, S. A. Short-term responses of soil and wheat yield to tillage, corn residue management and nitrogen fertilization. **Soil and Tillage Research**, v. 124, n. 4, p. 78-82, 2013.

ALMEIDA, R. E. M. **Fertilização nitrogenada no consórcio milho–braquiária em solos de clima tropical úmido no sistema de integração lavoura pecuária**. 2014. 149p. Tese (Doutorado em Ciências - Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

AMADO, T. J. C.; VILLALBA, E. O. H.; BORTOLOTO, R. P.; SANTI, A. L.; LEÓN, E. A. B.; MENEFE, D.; KUNZ, J. Efficiency of nitrogen fertilizer applied at corn sowing in

contrasting growing seasons in Paraguay. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1641-1650, 2013.

BRYSON, G. M.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook IV**: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. 4 ed. Athens: Micro Macro Publishing, 2015.

BURESH, R. J.; AUSTIN, E. R.; CRASWELL, E. T. Analytical methods in ^{15}N research. **Fertilizer Research**, v. 3, n. 1, p. 37-62, 1982.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIM, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 397-401, 2008.

CASAGRANDE, J. R. R. e FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 1, p. 33-40, 2002.

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

CHITOLINA, J. C. **Fertilizantes de lenta liberação de N**: conceitos; uréia coberta com enxofre. Piracicaba: ESALQ/USP, 1994. 16p.

CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.

DEKALB. **Híbridos de milho: DKB390**. Disponível em: <https://www.dekalb.com.br/pt-br/nossos-produtos/hibridos-milho/verao/DKB-390.html>. Acesso em: 7 dez. 2017.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency measurement and management. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Fertilizer best management practices**: general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2007. p. 1-28.

DOUGLAS, L. A.; RIAZI, A.; SMITH, C. J. A semi-micro method for determining total nitrogen in soils and plant material containing nitrate and nitrite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 431-433, 1980.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

FANCELLI, A. L. Cultura do milho: A importância da tecnologia. **Informações Agronômicas**, n. 1, p. 4-6, 1997.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. (2013). **ExpDes: Experimental Designs package**. R package version 1.1.2.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1262–1267, 2014.

FRENEY, J. R.; DENMEAD, O. T.; WOOD, A. W.; SAFFIGNA, P. G. Ammonia loss following urea addition to sugar cane trash blankets. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, v. 16, p. 114-121, 1994.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GINÉ, M. F.; BERGAMIN FILHO, H. ZAGATTO, E. A. G.; REIS, B. F. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flows injection analysis. **Analytica Chimica Acta**, v. 114, p. 191-197, 1980.

GOERTZ, H. M.; TIMMONS, R. J.; MCVEY, G. R. **Sulfur coated fertilizers and process for the preparation thereof**. US Pat.: EP 0574541 B1, 17 set. 1992.

GOES, R. J.; RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O.; VILELA, R. G. Nitrogênio em cobertura para o milho (*Zea mays* L.) em sistema plantio direto na safrinha. **Revista Brasileira de Milho Sorgo**, v. 11, n. 2, p. 169-177, 2012.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GOOD, A. G.; SHRAWAT, A. K.; MUENCH, D. G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science**, v. 9, n. 12, p. 597-605, 2004.

GRANT, C. A.; WU, R.; SELLES, F.; HARKER, K. N.; CLAYTON, G. W.; BITTMAN, S.; ZEBARTH, B. J.; LUPWAYI, N. Z. Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding. **Field Crops Research**, v. 127, p. 170-180, 2012.

GUEDES, B. R.; DAMACENO, Y. R. P.; PINTO, A. A.; SANTOS, S. L. L.; CAMARA, F. T. Produtividade de massa verde de milho transgênico em função da adubação em regime de sequeiro no Cariri-CE. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 15, n. 2, p. 53-61, 2017.

GUELFI, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

HALVORSON, A. D.; DEL GROSSO, S. J. Nitrogen placement and source effects on nitrous oxide emissions and yields of irrigated corn. **Journal of Environmental Quality**, v. 42, n. 2, p. 312-322, 2013.

HALVORSON, A. D.; BARTOLO, M. E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 681-693, 2014.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION (Paris, França). **Assessment of fertilizer use by crop at the global level**. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

KANEKO, F. H.; ARF, O.; SABUNDJIAN, M. T.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; LEAL, A. J. F.; NASCIMENTO, V. Fontes e modos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em sistema plantio direto. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 2, p. 191-196, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatology: a study of the climates of the earth**. Mexico City: Fondo de Cultura Economica, 1948. 233p.

LADHA, J. K.; TIROL-PADRE, A.; REDDY, C. K.; CASSMAN, K. G.; VERMA, S.; POWLSON, D. S.; VAN KESSEL, C.; RICHTER, D. B.; CHAKRABORTY, D.; PATHAK, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. **Scientific Reports**, v. 6, n. 19335, 2016.

MAESTRELO, P. R.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; RODRIGUES, M. A. C.; LINO, A. C. M.; ANDREOTTI, M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 2, p. 192-199, 2014.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 450-461, 2013.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; MEGDA, M. X. V.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012.

MARTINS, I. S.; CAZETTA, J. O.; FUKUDA, A. J. F. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 3, p. 271-279, 2014.

MELO, A. V.; SANTOS, V. M.; VARANDA, M. A. F.; CARDOSO, D. P.; DIAS, M. A. R. Desempenho agrônomo de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no sul do estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 2, p. 177-189, 2018.

NASH, P. R.; NELSON, K. A.; MOTOVALLI, P. P. Corn yield response to polymer and non-coated urea placement and timings. **International Journal of Plant Production**, v. 7, n. 3, p. 373-392, 2013.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, n. 225, p. 109-120, 2016.

NGUYEN, T. H.; SHINDO, H. Effects of different levels of compost application on amounts and distribution of organic nitrogen forms in soil particle size fractions subjected mainly to double cropping. **Agricultural Sciences**, v. 2, n. 3, p. 213-219, 2011.

OSTERHOLZ, W. R.; RINOT, O.; LIEBMAN, M.; CASTELLANO, M. J. Can mineralization of soil organic nitrogen meet maize nitrogen demand? **Plant and Soil**, v. 415, n. 1-2, p. 73-84, 2017.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Ciência Rural**, v. 48, n. 3, p. 413-418, 2017.

PRAMMANEE, P.; SAFFIGNA, P. G.; WOOD, A. W.; FRENEY, J. R. Loss of nitrogen from urea and ammonium sulphate applied to sugar cane crop residues. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, v. 11, p. 76-84, 1989.

PAYNE, K. M.; HANCOCK, D. W.; CABRERA, M. L.; LACY, R. C.; KISSEL, D. E. Blending polymer-coated nitrogen fertilizer improved Bermuda grass forage production. **Crop Science**, v. 55, n. 6, p. 2918-2928, 2015.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 4, p. 1015-1020, 2004.

QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, A. A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 3, p. 257-266, 2011.

R CORE TEAM (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim técnico 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto agrônômico FUNDAG, 1996. 285p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

REIS, B. F.; VIEIRA, J. A.; KRUG, F. J.; GINÉ, M. F. Development of a flow injections system two analytical paths for ammonium determination in soil extracts by conductometry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 8, n. 5, p. 523-528, 1997.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; SILVA, P. R. F. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillages system in a soil with high organic matter content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 507-517, 2007.

SHAO, G.; LI, Z.; NING, T.; ZHENG, Y. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and grain yield of maize to controlled-release urea and irrigation after anthesis. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, p. 595-602, 2013.

SILVA, I. T.; ABBARAJU, H. K. R.; FALLIS, L. P.; LIU, H.; LEE, M.; DHUGGA, K. S. Biochemical and genetic analyses of N metabolism in maize testcross seedlings: 1. Leaves. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 130, n. 7, p. 1453-1466, 2017.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA; Natural Resources Conservation Service. 2014.

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M.; LAMPERT, V. N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 4, p. 511-518, 2010.

SOUFIZADEH, S.; MUNADO, E.; MCLEAN, G.; MASSIGNAM, A.; VAN OOSTEROM, E. J.; CHAPMAN, S. C.; MESSINA, C.; COOPER, M.; MARTELO, G. L. Modelling the nitrogen dynamics of maize crops – Enhancing the APSIM maize model. **European Journal of Agronomy**, p. 1-14, 2018.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 659-670, 2014.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

XU, G. H.; FAN, X. R.; MILLER, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 153-182, 2012.

YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? **Informações Agronômicas**, n. 91, p. 1-5, 2000.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha da cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da biomassa inicial e da adição de vinhaça à superfície do solo. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 135-144, 2017.

ZHANG, S.; SADRAS, V.; CHEN, X.; ZHANG, F. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. **Field Crops Research**, v. 163, p. 55-63, 2014.

ZHAO, B.; DONG, S.; ZHANG, J.; LIU, P. Effects of controlled-release fertilizer on nitrogen use efficiency in summer maize. **Plos One**, v. 8, n. 8, p. 1-8, 2013.

3. VIABILIDADE ECONÔMICA DE FONTES E DOSES DE N NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

O nitrogênio (N) é o nutriente que mais impulsiona a produtividade de grãos, tendo uma significativa representatividade no custo de produção no cultivo do milho. Nesse contexto, objetivou-se realizar uma análise econômica entre doses de N e diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho, em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. Dois experimentos foram conduzidos nas safras 2015/16 e 2016/17 em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses de N, em superfície e sobre a cobertura de palha de cana-de-açúcar, a saber: 75, 150, 225 e 300 kg de N ha⁻¹, utilizando-se três fertilizantes nitrogenados: ureia convencional, nitrato de amônio e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (30%) e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (70%), além de um tratamento controle (sem fertilização com N). Foram avaliadas a produtividade e o acréscimo na produtividade de grãos, valor de produção, custo da adubação e a margem de lucratividade. Os resultados de produtividade e acréscimo na produtividade de grãos foram submetidos à análise de variância aplicando-se o teste F ($p \leq 0,1$), sendo as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Fischer ($p \leq 0,1$), e usou-se da análise de regressão polinomial quando significativos. Os tratamentos mostraram as condições climáticas se constituiu no principal fator limitante para a produtividade de grãos e que o custo da adubação é impulsionado pelo preço dos fertilizantes nitrogenados e pelo aumento da dose de N. O fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada mostrou-se pouco viável economicamente devido ao custo de aquisição.

Palavras-chave: Fertilizante de liberação controlada; Margem de lucratividade; Nitrato de amônio; Ureia; Viabilidade econômica

ABSTRACT

Nitrogen (N) presents a complex dynamic in the soil-plant-atmosphere system, and it is necessary to seek alternatives to increase its efficiency of use, besides being the nutrient that most boosts the grain yield, having a significant representativeness in the effective operational cost in the cultivation. In this context, the objective was to carry out an economic analysis between N doses and different nitrogen fertilizers applied in corn phenolic stage V4 in a sugarcane/maize succession system. Two experiments were conducted in the 2015/16 and 2016/17 crops in a randomized complete block design with four replications. The treatments consisted of the application of four doses of N, on the surface and on the coverage of sugarcane straw, namely: 75, 150, 225 and 300 kg of N ha⁻¹, using three nitrogen fertilizers: urea, ammonium nitrate and blend conventional urea treated with NBPT (30%) and urea coated with elemental sulfur (S⁰) and polymers (70%), in addition to a control treatment (without fertilization with N). The productivity and the increase in grain yield, production value, cost of fertilization and profit margin were evaluated. The results of productivity and increase in grain yield were subjected to analysis of variance by applying the F test ($p \leq 0,1$) and the means of the treatments were compared by Fischer test ($p \leq 0,1$), and used polynomial regression analysis when significant. The treatments showed the climatic conditions was the

main limiting factor for grain yield and that the cost of fertilization is driven by the price of nitrogen fertilizers and the increase of the N dose. Nitrogen fertilizer of increased efficiency was not economically viable due to the acquisition cost.

Keywords: Controlled release fertilizer; Margin of profitability; Ammonium nitrate; Urea; Economic viability

3.1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um dos principais cereais cultivados e consumidos no mundo em virtude do seu alto potencial produtivo, composição química e valor energético. No Brasil, o cereal encontra-se amplamente disseminado devido à sua utilização como fonte de energia, de alimento para animais domésticos e para os seres humanos e às múltiplas utilidades de seus derivados nas indústrias (ALVES et al., 2015). O Brasil é o terceiro maior produtor desse cereal no mundo, superado apenas pelos Estados Unidos da América (371,0 milhões de toneladas) e pela China (215,9 milhões de toneladas) (FIESP, 2018; USDA, 2018). Na safra 2015/16, houve um recuo na intenção de plantio (redução de 2%) em relação à safra anterior, com área cultivada de 15,6 milhões de hectares, produção de 67 milhões de toneladas e produtividade média de 4,2 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2016). A área estimada na safra 2016/17 apresentou incremento de 10,5% em relação a anterior, incentivado pelos produtores da região Centro-Sul que aumentaram a área de plantio, totalizando uma área cultivada no país de 17,5 milhões de hectares, produção de 97 milhões de toneladas e produtividade média de 5,5 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2017).

Entre os fatores responsáveis pela alta produtividade da cultura do milho nos Estados Unidos da América, está o aumento expressivo no uso de fertilizantes nitrogenados (ARAÚJO; FERREIRA; CRUZ, 2004). A produtividade média do Brasil ainda é muito baixa e pode ser justificada pela quantidade utilizada do nutriente, em média de 40 kg de N ha⁻¹, na China é de 130 kg de N ha⁻¹ e nos Estados Unidos da América de 150 kg de N ha⁻¹ (IFA, 2017). Além disso, a baixa produtividade brasileira está associada ao milho de segunda safra, uma vez que, a adubação nitrogenada não é tão efetuada devido à época do plantio e às condições climáticas (luminosidade e pluviosidade) podem interferir no rendimento de grãos. Dessa forma, o estudo de fontes e doses de N têm sido uma das práticas agrícolas mais estudadas no sentido de melhorar a sua eficiência de uso a fim de alcançar altas produtividades, dado que os fertilizantes nitrogenados apresentam comportamento distintos quando aplicados ao solo, nos diferentes sistemas de cultivo e condições edafoclimáticas

(FIGUEIREDO et al., 2005; KANEKO et al., 2015), além de terem impacto sobre o custo de produção da cultura.

A adubação nitrogenada na cultura do milho é realizada, principalmente, aplicando-se parte do N recomendado no plantio e o restante em cobertura e sem incorporação (PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004). No Brasil, para o Estado de São Paulo, recomenda-se 30 kg de N ha⁻¹ no plantio (aplicações superiores a essa dose pode acarretar problemas de salinização do solo e/ou alcalinização da rizosfera, a depender da fonte do nutriente utilizada) e a quase totalidade do N entre os estádios V4 e V8 (quatro e oito folhas totalmente expandidas) com até 140 kg de N ha⁻¹, em função das transformações do N no solo que podem possibilitar perdas por imobilização, lixiviação, desnitrificação e volatilização de amônia (NH₃) (RAIJ et al., 1996; YAMADA; ABDALLA, 2000).

Dessa forma, se o fertilizante nitrogenado utilizado para aplicação na superfície do solo for a ureia (U), poderão ocorrer perdas por volatilização de NH₃ (OTTO et al., 2017). Esse fertilizante nitrogenado se destaca por ser a fonte de N mais empregada no Brasil e no mundo, possuindo elevada concentração em N, alta solubilidade, menor custo e facilidade de produção e de mistura com outras fontes de nutrientes (FRAZÃO et al., 2014; IFA, 2017). Uma das alternativas para minimizar as perdas de N no sistema de cultivo é a utilização do nitrato de amônio (NA), por conter um radical nítrico e outro amoniacal, esse fertilizante sofre menores perdas por volatilização e acidifica menos o solo, comparado aos demais fertilizantes nitrogenados. No entanto, o NA possui aspectos negativos que se relacionam ao seu poder oxidante, uso indevido como explosivo e restrições quanto a sua comercialização (PROCHNOW; ABDALLA, 2007).

Com o objetivo de diminuir perdas, principalmente, por volatilização de NH₃ e lixiviação, vêm sendo desenvolvidos fertilizantes que podem promover a eficiência de uso do N em comparação aos fertilizantes nitrogenados convencionais, sendo denominados de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada (TRENKEL, 2010; TIMILSENA et al., 2014). Esses fertilizantes são classificados conforme as tecnologias utilizadas nos processos de produção (GUELFI, 2017). A partir dessa classificação, destacam-se os fertilizantes nitrogenados estabilizados, sendo aqueles em que a U é tratada com aditivos para estabilização do N, destacando-se os inibidores de urease (NBPT) e de nitrificação (DMPP e DCD), e os fertilizantes nitrogenados de liberação lenta e controlada, em que os grânulos da U podem ser revestidos com camadas de enxofre elementar (S⁰) e/ou polímeros promovendo a liberação do N de forma gradual através de uma barreira física semipermeável das formas solúveis, contra a exposição do nutriente para o meio externo, evitando-se a atuação dos

mecanismos de perdas (NAZ; SULAIMAN, 2016; GUELF, 2017). A desvantagem desses fertilizantes se relaciona ao limitado uso devido ao elevado preço de mercado para as culturas comerciais intensivas (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; HALVORSON; BARTOLO, 2014).

A partir da adoção de novas tecnologias agrícolas (fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada), o produtor tem a possibilidade de aumentar a produtividade de grãos de milho em diferentes sistemas de cultivo, visto que há grande variação quanto à produtividade de grãos, nos diferentes estados brasileiros, a partir do nível tecnológico de produção empregado (COELHO; CRUZ; PEREIRA FILHO, 2003). Entretanto, o nível de tecnologia e os investimentos empregados podem resultar no aumento do custo de produção da cultura. O alto custo na produção do milho, em razão do nível tecnológico, aliado a oscilação no preço de mercado dos produtos, podem acarretar em perda de lucratividade ou, até mesmo, em prejuízos nas atividades (ARTUZO et al., 2018). Nesse contexto, se faz necessário uma avaliação econômica da produção de milho avaliando os diferentes fertilizantes nitrogenados disponíveis no mercado em diferentes sistemas de cultivo.

Diversos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos com o intuito de estudar doses de N e a eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados em cultivos de cereais, incluindo os fertilizantes nitrogenados de liberação controlada (GUO et al., 2017; ZHENG et al., 2017; GARCIA et al., 2018, GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018). Embora o uso dos fertilizantes nitrogenados seja eficiente e possui a capacidade de aumentar a produtividade de grãos de milho, nem sempre esse acréscimo na produtividade é suficiente para cobrir os custos de produção e proporcionar a lucratividade esperada, sendo escassos os estudos que avaliam a sua viabilidade econômica (SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015). Nesse contexto, objetivou-se realizar uma análise econômica de doses de N na forma de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho, em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo

O estudo foi realizado nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17 no município de Altair e Severínia, Estado de São Paulo, Brasil, localizado nas coordenadas geográficas de

20°25'44''S, 49°04'04''W, 531 m de altitude e 20°45'19''S, 48°74'91''W, 523 m de altitude, respectivamente. Os solos dos locais são classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (EMBRAPA, 2013), correspondente a um Typic Eustrtox (SOIL SURVEY STAFF, 2014). De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima das regiões é do tipo Aw, definido como zona tropical úmida com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A temperatura média máxima e mínima durante o ciclo da cultura do milho foram, respectivamente, 30,8 e 20,2 °C na safra 2015/16 e 30,9 e 19,5 °C na safra 2016/17. A pluviosidade média, na primeira e segunda safra avaliada, foram, respectivamente, 800,9 e 514,4 mm. Os dados meteorológicos foram obtidos no posto meteorológico da Estação Experimental de Citricultura de Bebedouro (EECB), distante aproximadamente 50 km da área experimental.

Antes da instalação dos experimentos, foram quantificados os atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2011) (Tabela 1). O preparo do solo ocorreu, aproximadamente, dois meses antes da semeadura do milho. A calagem foi realizada na superfície do solo, sem incorporação, visando elevar a saturação por bases para 70% (RAIJ et al., 2011). A adubação potássica contou com 120 kg de K_2O ha^{-1} na forma de cloreto de potássio, aplicado três dias antes da semeadura do milho. A adubação de semeadura foi realizada com a aplicação de 60 kg de N ha^{-1} com fosfato monoamônico (MAP) aplicado no sulco de semeadura e adubação complementar de fósforo com uma dose de 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} utilizando o superfosfato simples. A semeadura do híbrido de milho DKB 390 da Dekalb® (DEKALB, 2018) foi realizada mecanicamente nos dias 10 de dezembro de 2015 e 05 de dezembro de 2016, respectivamente, as safras 2015/16 e 2016/17.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial $(3 \times 4) + 1$, a saber: quatro doses totais de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1}), além de um tratamento controle (sem fertilização com N) e três fertilizantes nitrogenados: ureia convencional (45% de N) (U), nitrato de amônio (32% de N) (NA) e um *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (45% de N) e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (39% de N) (U+UREP), na proporção 30:70, respectivamente da marca Producote® (Patente Nº: EP 0574541 B1) (GOERTZ; TIMMONS; MCVEY, 1992), produzido e comercializado pela Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals com o nome comercial Polyblen®. Os fertilizantes foram aplicados em filete, na superfície e sobre a cobertura de palha de cana-de-açúcar em uma única aplicação a 0,1 m de distância das linhas das plantas no estádio fenológico V4 do milho,

em parcelas experimentais de 20,0 m de comprimento com seis linhas e espaçadas com 0,7 m, na qual a área útil constituiu-se das quatro linhas centrais, de 16 m de comprimento cada, totalizando uma densidade populacional de 64 mil plantas ha⁻¹.

Tabela 1 – Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/2017.

Características	Profundidade (m)					
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
	Safr 2015/16			Safr 2016/17		
pH CaCl ₂	5,6	5,5	5,0	5,5	5,6	5,6
MO (g dm ⁻³)	5,0	5,0	5,0	16,0	5,0	7,0
P _{resina} (mg dm ⁻³)	31,0	19,0	6,0	46,0	24,0	11,0
K (mmol _c dm ⁻³)	2,0	1,0	1,0	2,0	2,0	1,0
Ca (mmol _c dm ⁻³)	18,0	13,0	10,0	21,0	18,0	20,0
Mg (mmol _c dm ⁻³)	6,0	6,0	7,0	6,0	7,0	10,0
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	18,0	18,0	22,0	18,0	16,0	18,0
Al (mmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0
SB (mmol _c dm ⁻³)	26,0	20,0	18,0	30,0	27,0	31,0
CTC (mmol _c dm ⁻³)	44,0	38,0	40,0	48,0	43,0	49,0
V (%)	59	53	45	62	62	63
m (%)	0,0	0,0	10	0,0	0,0	0,0
S-SO ₄ (mg dm ⁻³)	8,0	14,0	14,0	7,0	8,0	11,0
Cu (mg dm ⁻³)	1,0	0,5	0,3	3,7	1,7	0,9
Fe (mg dm ⁻³)	13,0	9,0	5,0	26,0	9,0	6,0
Zn (mg dm ⁻³)	0,9	0,4	0,2	1,5	0,6	0,3
Mn (mg dm ⁻³)	3,1	2,9	2,4	19,6	16,0	9,0
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3
Argila (%)	18	19	20	18	20	33
Silte (%)	1	4	3	2	1	2
Areia (%)	81	77	77	80	79	65

MO: matéria orgânica (colorimétrica); P_{resina}: fósforo (método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons); K: potássio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica); Ca e Mg: cálcio e magnésio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica); H+Al: acidez potencial (extraído com tampão SMP); Al: alumínio trocável (método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; V%: saturação por bases; Cu, Fe, Zn e Mn: cobre, ferro, zinco e manganês (extraído com DTPA); B: boro (extraído com água quente).

3.2.2 Avaliações e análises estatísticas

A colheita mecanizada do milho para determinar a produtividade de grãos foi realizada no estádio R6 do milho aos 105 e 115 dias após a emergência das plantas nas safras 2015/16 e 2016/17, respectivamente. Os grãos foram pesados e os resultados foram expressos com a umidade corrigida para 13%, em Mg ha^{-1} , utilizando no cálculo o número de plantas por hectare do experimento.

A determinação da análise econômica foi baseada na técnica da orçamentação parcial descrita por Noronha (1987) e no estudo realizado por Souza, Buzetti; Moreira (2015). Foram determinados as receitas e os custos adicionais da adubação nitrogenada, calculando-se: (1) acréscimo na produtividade de grãos – diferença da produtividade em cada tratamento e o tratamento controle (sem fertilização com N) (kg ha^{-1}); (2) valor de produção – produto entre o acréscimo na produtividade de grãos (sacos de 60 kg) e o preço médio recebido pelo produtor ($\text{US\$ sc}^{-1}$); (3) custo da adubação nitrogenada – produto entre a dose de N em cada tratamento (kg de N ha^{-1}) e o preço do kg do N em cada fertilizante nitrogenado utilizado ($\text{US\$ kg}^{-1}$ de N) somados ao custo da aplicação do fertilizante; (4) margem de lucratividade – diferença entre o valor de produção e o custo da adubação nitrogenada ($\text{US\$ ha}^{-1}$).

Os preços médios foram apresentados em reais (R\$) e convertidos em dólares americanos (US\$), considerando o dólar comercial no valor de R\$3,24 (média do primeiro trimestre de 2018). Considerou-se o preço da tonelada da U e do NA, no valor de US\$286,00 e US\$267,00 (*Free On Boarb* – FOB), respectivamente, sendo esses valores calculados mediante o levantamento do preço médio no mês de janeiro de 2018 (GLOBALFERT, 2018). Por ser um fertilizante não convencional, o preço do *blend* de U+UREP não se encontra disponível para consulta.

A partir dos preços da tonelada da U e do NA, foram determinados os preços do quilograma do N em cada fertilizante nitrogenado utilizado. Os custos do quilograma do N proveniente da U (45% de N) e do NA (32% de N) foram, respectivamente, US\$0,62 e US\$0,83. O preço médio do quilograma do N proveniente do *blend* de U+UREP (39% de N) foi calculado em US\$1,58 (*Free On Boarb* – FOB) com base em consulta à empresa fabricante do fertilizante e seus representantes em janeiro de 2018. O custo da aplicação do N em cobertura foi calculado em US\$21,37 ha^{-1} pela média das safras agrícolas 2015/16 e 2016/17 na região Centro-Sul do Brasil, no valor de US\$19,12 ha^{-1} em dezembro de 2015 (IMEA, 2015) e de US\$23,62 ha^{-1} em dezembro de 2016 (IMEA, 2016). O preço do milho

refere-se ao preço médio da saca de 60 kg recebido pelos produtores no mês de janeiro de 2018 (US\$9,17), publicados no IEA (2018).

Os preços pagos e recebidos pelos produtores para o milho e os fertilizantes nitrogenados corresponderam aos preços médios sem deflação no mês de janeiro de 2018. Nesse estudo, optou-se por não utilizar alguns preços referentes aos meses e anos da condução dos estudos devido à alta flutuação no valor do câmbio do dólar americano, sendo representado por valores atuais de mercado.

Os resultados de produtividade de grãos e acréscimo na produtividade de grãos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando-se o teste F, sendo a significância interpretada por comparação de médias pelo teste de Fischer (LSD) ($p \leq 0,1$), e quando significativos, foi realizada análise de regressão polinomial de primeiro e segundo grau. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o pacote ExpDes (FERREIRA et al., 2013), a partir do programa livre R (R CORE TEAM, 2017).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produtividade média de grãos de milho foi de 7,3 e 6,1 Mg ha⁻¹ nas safras 2015/16 e 2016/17, respectivamente. Na safra 2015/16, não houve diferenças na produtividade de grãos entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle, porém as médias das produtividades em função das doses de N foram ajustadas por modelo linear. Na safra seguinte, a significância da comparação de médias não revelou diferenças para os fertilizantes nitrogenados e as doses de N e o tratamento sem fertilização com N, sendo apresentadas somente as médias dos tratamentos. A análise de variância mostrou que não houve interação entre os fatores estudados, sendo significativos apenas quando analisados isoladamente como já comentado anteriormente (Figura 1A). Como não houve diferença significativa na produtividade de grãos entre os fertilizantes nitrogenados em ambas as safras é possível inferir que o fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada (*blend* de U+UREP) não atingiu o objetivo a que se destina e obterá menor lucratividade em relação aos demais fertilizantes nitrogenados avaliados, ao menos em um sistema de cultivo de sucessão cana-de-açúcar/milho. A produtividade média do tratamento controle na safra 2015/16 (5,98 Mg ha⁻¹) foi 4,7% superior ao cultivo na safra 2016/17 (5,70 Mg ha⁻¹). No entanto, mesmo com produtividades semelhantes entre os tratamentos controle em ambas as safras, as diferentes

respostas na produtividade de grãos em função das doses de N, ocasionou em diferenças no acréscimo na produtividade de grãos em cada ano de cultivo (Figura 1B).

Os resultados são atípicos para a cultura, levando em consideração as altas doses de N avaliadas, pois, de acordo com DeBruin et al. (2017) o milho responde positivamente à adição de N. A falta de resposta na produtividade de grãos à aplicação de N ocorre quando o fator limitante não é a disponibilidade de N, mas qualquer outro fator importante (geralmente as condições edafoclimáticas) (SCHONINGER et al., 2018). Entretanto, os resultados do acréscimo na produtividade de grãos (Figura 1B) mostram o efeito benéfico da adubação nitrogenada na produtividade do milho e estão de acordo com Coelho (2008), em que o autor relatou que 80% dos trabalhos de pesquisa realizados envolvendo doses de N, o milho respondeu de forma positiva à essa adição. De acordo com Zucareli et al. (2012), a magnitude das respostas ao N na cultura do milho no Brasil tem sido variáveis, porém, a maioria dos trabalhos indicaram respostas positivas quando avaliadas doses de N, devido, em parte, aos níveis de baixa produtividade encontrados nos estados brasileiros (COELHO; CRUZ; PEREIRA FILHO, 2003). Contudo, é preciso ressaltar a importância da análise econômica quando avaliada a aplicação de fontes e doses de N na cultura do milho, uma vez que a análise dos custos da adubação nitrogenada pode mostrar se o incremento na produtividade de grãos pode ser economicamente viável ou não (SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015). Dessa forma, as informações sobre os custos de uma cultura possuem grande importância e relevância para os produtores rurais, pois os custos de produção podem fornecer uma linha a ser seguida e adotada, permitindo-lhes dispor e combinar recursos visando melhores resultados de produção (CREPALDI, 1998).

Figura 1 – Produtividade de grãos e acréscimo na produtividade do milho, em função das doses de N dos fertilizantes nitrogenados: ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17. Os símbolos são os valores observados e as linhas são os valores previstos, a partir do estudo da análise de regressão.

A disponibilidade do N mineral no solo está diretamente relacionada ao histórico de uso da área cultivada, à produtividade de grãos esperada, ao preço de mercado da saca de milho e ao custo de aquisição dos fertilizantes nitrogenados, sendo esses, alguns dos fatores que podem determinar a quantidade de N a ser utilizado na adubação de um determinado local (SILVA; BUZETTI; LAZARINI, 2005). Os fatores acima descritos tendem a influenciar no aproveitamento do N e na produtividade de grãos, assim como na qualidade dos grãos e na lucratividade dos produtores rurais (SILVA et al., 2007).

Mantendo-se o preço da saca do milho no mês de janeiro de 2018 (US\$9,17) constante nos dois anos de cultivo, as variações no valor de produção referentes à adubação nitrogenada são proporcionais ao acréscimo na produtividade de grãos em função das doses de N, assim como observado por Souza; Buzetti; Moreira (2015) que avaliaram a viabilidade econômica de fontes e doses de N no cultivo do milho de segunda safra, em manejo de solo com sistema de plantio direto. A produtividade de grãos em resposta às doses de N é o fator determinante na margem de lucro da adubação nitrogenada. Estudos avaliando a viabilidade econômica e a rentabilidade do manejo da adubação nitrogenada em milho, mostraram que a máxima produtividade econômica se baseia no menor custo de produção (PAVINATO et al., 2008; SOUZA et al., 2012; ZUCARELI et al., 2012; SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015).

Na safra 2015/16 a dose de 75 kg de N ha⁻¹ na forma de U e todas as doses do *blend* de U+UREP proporcionaram margem de lucratividade negativa, e os maiores ganhos ocorreram na dose de 300 kg de N ha⁻¹ com a U. Na safra seguinte, houve margem de ganho negativo nas doses de 225 kg de N ha⁻¹ na forma de U e NA, 300 kg de N ha⁻¹ na forma de NA e em todas as doses de N quando realizada a adubação com o *blend* de U+UREP (Tabela 2). Souza et al. (2012) avaliando a lucratividade do milho em razão de diferentes fertilizantes nitrogenados, doses e épocas de aplicação do N, observaram que os resultados econômicos podem variar de um ano de cultivo para o outro, assim como observado nesse estudo. Mota; Mendes; Shirota (2015) avaliaram a viabilidade de implantação de vários tipos de ureia revestidas no cultivo de milho para o Estado de São Paulo e, observaram que os fertilizantes de liberação controlada não são uma alternativa viável em substituição à U na maioria dos cenários avaliados em relação ao manejo da adubação nitrogenada.

Tabela 2 – Produtividade de grãos de milho, acréscimo na produtividade e no valor de produção, custo da adubação nitrogenada e margem de lucratividade, em função doses de N e dos fertilizantes nitrogenadas, ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), nas safras agrícolas 2015/16 e 2016/17.

Tratamentos		Acréscimo								
Fontes de N	Doses de N kg ha ⁻¹	Produtividade de grãos		Valor de				Custo da adubação US\$ ha ⁻¹	Margem de lucratividade	
		— Mg ha ⁻¹ —		Produtividade		Produção			— US\$ ha ⁻¹ —	
		15/16	16/17	15/16	16/17	15/16	16/17		15/16	16/17
Controle	0	5,98	5,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U	75	6,33	4,46	0,35	0,45	53,49	68,78	67,87	-14,38	0,91
U	150	7,46	4,46	1,48	0,83	226,19	126,85	114,37	111,82	12,48
U	225	7,43	4,77	1,45	0,60	221,61	91,70	160,87	60,74	-69,17
U	300	8,20	6,13	2,22	1,83	339,29	279,69	207,37	131,92	72,32
Média (U)		7,36	4,96	1,38	0,93	210,15	141,75	137,62	72,53	4,13
NA	75	6,86	8,31	0,88	0,69	134,49	105,46	83,62	50,87	21,84
NA	150	7,71	9,01	1,73	1,12	264,40	171,17	145,87	118,53	25,30
NA	225	8,10	8,27	2,12	0,88	324,01	134,49	208,12	115,89	-73,63
NA	300	8,12	7,31	2,14	0,00	327,06	0,00	270,37	56,69	-270,37
Média (NA)		7,70	8,23	1,72	0,67	262,49	102,78	177,00	85,50	-74,21
U+UREP	75	5,75	5,44	0,00	0,15	0,00	22,93	139,87	-139,87	-116,95
U+UREP	150	7,12	5,32	1,14	0,92	174,23	140,61	258,37	-84,14	-117,76
U+UREP	225	7,87	5,08	1,89	0,82	288,86	125,32	376,87	-88,02	-251,55
U+UREP	300	8,22	4,77	2,24	1,01	342,35	154,36	495,37	-153,02	-341,01
Média (U+UREP)		7,24	5,15	1,32	0,73	201,36	110,80	317,62	-116,26	-206,82
Média total		7,07	6,01	1,10	0,58	168,50	88,83	158,06	10,44	-69,22

São bastante expressivos os custos da adubação nitrogenada quando avaliada uma mesma dose de N em relação aos fertilizantes nitrogenados, nos quais podem variar de 18 a 23% da U em relação ao NA, de 40 a 45% do NA em relação ao *blend* de U+UREP e de 51 a 58% da U em relação ao *blend* de U+UREP. A variação no custo da adubação é impulsionada pelo custo dos fertilizantes nitrogenados. Dessa forma, Souza; Buzeti; Moreira (2015) observaram uma variação de 60 a 70% quando utilizados fertilizantes de eficiência aumentada (sulfonitrato de amônio com inibidor de nitrificação) em relação à U. O custo dos fertilizantes é um dos itens que compõe o custo operacional efetivo da produção do milho (MATSUNAGA et al., 1976). No estudo realizado por Furlaneto; Esperancini (2010) foi possível verificar que o custo operacional efetivo pode representar de 40 a 45% dos gastos relativos aos fertilizantes quando se emprega média ou alta tecnologia, demonstrando a

significativa participação dos fertilizantes nitrogenados no custo de produção no cultivo do milho.

A adubação com o *blend* de U+UREP proporcionou margem de lucratividade negativa em ambos os anos de cultivo avaliados, estando associada aos maiores custos na unidade do N por quilograma de fertilizante (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; HALVORSON; BARTOLO, 2014). Mota; Mendes; Shirota (2015) observaram que o elevado custo dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada revestido por diferentes materiais poliméricos pode onerar o custo de produção e demonstrar-se economicamente inviável. Queiroz et al. (2011) avaliaram diferentes fertilizantes nitrogenados e doses de N na adubação do milho e, mostraram que o custo da URP é maior quando comparada aos outros fertilizantes convencionais, como a U e o NA. Os resultados obtidos corroboram com Civardi et al. (2011), que ao avaliarem a URP (KimCoat N[®]) aplicada superficialmente no solo e a U incorporada ao solo no rendimento do milho, constataram que o manejo convencional da cultura do milho proporcionou viabilidade econômica superior aos tratamentos com a URP em superfície.

A U resultou nos maiores ganhos em lucratividade na maior dose avaliada (300 kg de N ha⁻¹) em ambas as safras, independentemente da resposta do milho na produtividade de grãos. A U na dose de 75 kg de N ha⁻¹ proporcionou margem de lucro negativa e menor na safra 2015/16 e 2016/17, respectivamente. Pavinato et al. (2008) realizaram a análise técnica e econômica da adubação nitrogenada em milho irrigado e, concluíram que a aplicação de 156 a 158 kg de N ha⁻¹ quando utilizado a U de forma parcelada junto à linha de cultivo da cultura permitiu a máxima eficiência econômica e retorno financeiro para o produtor. Santos et al. (2013) verificaram que a máxima eficiência econômica é alcançada com o uso da U na dose de 228 kg de N ha⁻¹ nas mesmas condições de adubação desse estudo (aplicação do fertilizante em filete, na superfície em uma única aplicação a 0,1 m de distância das linhas das plantas no estágio V4 do milho). Os resultados obtidos na literatura foram desenvolvidos em condições edafoclimáticas, tipos de solos e sistemas de cultivo distintos, dificultando a previsão de resposta da cultura do milho à adubação nitrogenada. Além disso, a resposta da cultura em função dos fertilizantes nitrogenados e doses de N podem variar conforme a época e o modo de aplicação do fertilizante nitrogenado (MAESTRELO et al., 2014).

Embora a U tenha proporcionado margem de ganho positivo no cultivo do milho em ambas as safras na dose de 300 kg de N ha⁻¹, os outros fertilizantes nitrogenados apresentaram ganhos distintos em relação à dose de N. Dessa forma, mesmo com o menor custo da unidade do N por kg de U em relação ao NA e ao *blend* de U+UREP, a adubação nitrogenada com

elevadas doses de N pode não ser viável economicamente devido à resposta linear na produtividade de grãos (Figura 1A) que impulsionou uma resposta quadrática no acréscimo na produtividade de grãos (Figura 1B).

Os pontos de máximo retorno econômico no acréscimo na produtividade de grãos (330 e 280 kg de N ha⁻¹ na safra 2015/16 e 2016/17, respectivamente) podem variar em função dos fertilizantes nitrogenados, doses de N e da própria produtividade de grãos. Queiroz et al. (2011) verificaram que a dose de 120 kg de N ha⁻¹ é o suficiente para proporcionar o melhor retorno econômico independente do fertilizante nitrogenado utilizado (U, NA ou URP), porém quando utilizado a U houve um melhor custo-benefício devido ao custo desse fertilizante ser menor em comparação ao NA. Os pontos de máximo retorno econômico de ambas as safras estão além dos valores observados na literatura o que pode ser justificado pelo sistema de cultivo da área experimental: sucessão cana-de-açúcar/milho. Esse sistema de cultivo promove um grande aporte de palha de cana-de-açúcar com alta relação C:N, o que leva à imobilização de grande parte do N aplicado (VITTI et al., 2007; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017), além de favorecer as perdas de N por volatilização de NH₃ devido à atividade da enzima urease presente nos resíduos culturais (TRIVELIN et al., 2002, MARIANO et al., 2012; OTTO et al., 2017), afetando diretamente a EUN dos fertilizantes nitrogenados avaliados e a produtividade de grãos. Além disso, a falta de resposta na produtividade de grãos entre os fertilizantes nitrogenados (Figura 1A), em ambos os anos de cultivo, pode estar associado à disponibilidade de água no solo (intensidade e distribuição das chuvas) que pode ter sido o principal fator limitante na produção do milho, assim como comentado por Schoninger et al. (2018), afetando diretamente a rentabilidade e a lucratividade da atividade nesse sistema de cultivo.

Como já observado por Souza; Buzeti; Moreira (2015) os produtores devem estar atentos à escolha dos fertilizantes nitrogenados a serem utilizados, para otimizar e aumentar a eficiência de uso do N e, conseqüentemente, a utilização de menores doses de N para obtenção de altas produtividades com maior retorno econômico.

3.4 CONCLUSÕES

1. O custo da adubação foi impulsionado pelo preço dos fertilizantes nitrogenados e pelo aumento das doses de nitrogênio.

2. A adubação com 300 kg de N ha⁻¹ na forma de ureia promoveu a maior margem de lucratividade, em ambas as safras, no cultivo do milho em um sistema de sucessão à cana-de-açúcar.
3. A adubação com o *blend* de U+UREP não se mostrou ser uma alternativa economicamente viável no cultivo do milho, independentemente das doses e dos anos de cultivos avaliados.
4. A adubação com elevadas doses de nitrogênio não refletiu em maiores produtividade de grãos, devido à disponibilidade de água no solo que se constituiu no principal fator limitante.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B. M.; CARGNELUTTI FILHO, A.; BURIN, C.; TOEBE, M.; SILVA, L. P. Divergência genética de milho transgênico em relação à produtividade de grãos e à qualidade nutricional. **Ciência Rural**, v. 45, n. 5, p. 884-891, 2015.
- ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 8, p. 771-777, 2004.
- ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; SOUZA, A. R. L.; SILVA, L. X. Gestão de custos na produção de milho e soja. **Revista Brasileira de gestão de negócios**, v. 20, n. 2, p. 273-294, 2018.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, v. 102, p. 267-322, 2009.
- CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGANIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.
- COELHO, A. M. Adubação e nutrição do milho. In: CRUZ, J.C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. **A cultura do milho**. 1 ed. Sete Lagoas. Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 517p.
- COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Rendimento de milho no Brasil: chegamos ao máximo. **Informações Agronômicas**, n. 101, p. 1-12, 2003.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - safra 2015/16 - Décimo Segundo Levantamento**. Brasília: CONAB, 2016. 182p.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - safra 2016/17 - Décimo Segundo Levantamento**. Brasília: CONAB, 2017. 158p.

CREPALDI, S. A. **Contabilidade rural: uma abordagem decisorial**. 2ed. São Paulo: Atlas, 1998. 456p.

DeBRUIN, J. L.; SCHUSSLER, J. R.; MO, H.; COPPER, M. Grain Yield and Nitrogen accumulation in maize hybrids released during 1934 to 2013 in the US Midwest. **Crop Science**, v. 57, n. 3, p. 1-16, 2017.

DEKALB. **Híbridos de milho: DKB390**. Disponível em: <https://www.dekalb.com.br/pt-br/nossos-produtos/hibridos-milho/verao/DKB-390.html>. Acesso em: 4 jun. 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. (2013). **ExpDes: Experimental Designs package**. R package version 1.1.2.

FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Safra mundial de milho**. Disponível em: <http://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>. Acesso em: 02 out. 2018.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; URQUIAGA, S. Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 3, p. 279-287, 2005.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 1262-1267, 2014.

FURLANETO, F. P. B.; ESPERANCINI, M. S. T. Custo de produção e indicadores de rentabilidade da cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 297-303, 2010.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GLOBALFERT®. **Preços matérias-primas (CFR – Paranaguá)**. Disponível em: <https://globalfert.com.br/PrecosMP>. Acesso em: 5 jun. 2018.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding (>15 Mg ha⁻¹) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

HALVORSON, A. D.; BARTOLO, M. E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 681-693, 2014.

IEA - Instituto de Economia Agrícola. **Preços médios recebidos pelos agricultores**. Disponível em: <<http://ciagri.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IFA - International Fertilizer Association. **Assessment of fertilizer use by crop at the global level**. Disponível em:<<http://www.fertilizer.org>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

IMEA - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Relatórios de mercado: custo de produção do milho – safra 2015/16**. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/19012018200415.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

IMEA - Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Relatórios de mercado: custo de produção do milho – safra 2016/17**. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/19012018194738.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2018.

KANEKO, F. H.; ARF, O.; SABUNDJIAN, M. T.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; LEAL, A. J. F.; NASCIMENTO, V. Fontes e modos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em sistema plantio direto. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 2, p. 191-196, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatology: a study of the climates of the earth**. Mexico City: Fondo de Cultura Economica, 1948. 233p.

MAESTRELO, P. R.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; RODRIGUES, M. A. C.; LINO, A. C. M.; ANDREOTTI, M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 2, p. 192-199, 2014.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 450-461, 2013.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; MEGDA, M. X. V.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012.

MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N.; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. **Agricultura em São Paulo**, v. 23, p. 123-139, 1976.

MOTA, E. P.; MENDES, F. L.; SHIROTA, R. Viabilidade de implantação de ureias revestidas no cultivo de milho para Estado de São Paulo. **Revista iPecege**, v.1, n. 1, p. 22-38, 2015.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, n. 225, p. 109-120, 2016.

NORONHA, J. F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e avaliação econômica**. São Paulo: Atlas, 1987. 269p.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Ciência Rural**, v. 48, n. 3, p. 413-418, 2017.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTO, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 4, p. 1015-1020, 2004.

PROCHNOW, L. I.; ABDALLA, S. R. S. A indústria de fertilizantes nitrogenados e o futuro. **Informações Agronômicas**, n. 120, p. 2-16, 2007.

QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, A. A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 3, p. 257-266, 2011.

R CORE TEAM (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim técnico 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto agronômico FUNDAG, 1996. 285p.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

SANTOS, L. P. D.; AQUINO, L. A.; NUNES, P. H. M. P.; XAVIER, F. O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 3, p. 270-279, 2013.

SCHONINGER, E. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; BENDASSOLLI, J. A.; TRIVELIN, P. C. O. Corn grain yield and 15N-fertilizer recovery as a function of urea sidedress timing. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 90, n. 4, p. 3299-3312, 2018.

SILVA, E. C.; BUZETTI, S.; LAZARINI, E. Aspectos econômicos da adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema plantio direto em Latossolo Vermelho distroférico fase cerrado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 3, p. 286-297, 2005.

SILVA, E. C.; MURAOKA, T.; MONTEIRO, R. O. C.; BUZETTI, S. Análise econômica da adubação nitrogenada no milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura em Latossolo Vermelho. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 445-452, 2007.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA; Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; MOREIRA, A. Viabilidade econômica de fontes e doses de nitrogênio no cultivo do milho segunda safra em sistema de plantio direto. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 308-313, 2015.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; TARSITANO, M. A. A.; VALDERRAMA, M. Lucratividade do milho em razão das fontes, doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 321-329, 2012.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 45, p. 1131-1142, 2014.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **National agricultural statistics service reports by year**. Disponível em: <https://www.nass.usda.gov/Publications/Reports_By_Date/>. Acesso em: 02 out. 2018.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? **Informações Agronômicas**, n. 91, p. 1-5, 2000.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha da cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da biomassa inicial e da adição de vinhaça à superfície do solo. **Bragantia**, v. 76, n. 1, p. 135-144, 2017.

ZHENG, W.; LIU, Z.; ZHANG, M.; SHI, Y.; ZHU, Q.; SUN, Y.; ZHOU, H.; LI, C.; YANG, Y.; GENG, J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. **Field Crops Research**, v. 205, p. 106-115, 2017.

ZUCARELI, C.; PANOFF, B.; PORTUGAL, G.; FONSECA, I. C. B. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na qualidade fisiológica de sementes de milho doce. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 3, p. 480-487, 2012.

4. MODOS DE APLICAÇÃO E DOSES DE NITROGÊNIO COM USO DE *BLEND* CONTENDO UREIA REVESTIDA COM ENXOFRE ELEMENTAR E POLÍMERO NA CULTURA DO MILHO EM SUCESSÃO A CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

Fertilizantes de liberação controlada podem aumentar a eficiência de uso do nitrogênio (N) por cultivos agrícolas. Nesse contexto, objetivou-se avaliar os modos de aplicação e doses de N utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, em esquema fatorial $(2 \times 4) + 1$, compreendendo dois modos de aplicação do fertilizante: em cobertura e incorporado, combinadas com quatro doses de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1}), além de um tratamento controle (sem fertilização com N), com quatro repetições. Foram avaliados a produção de biomassa seca e o acúmulo de N em seis estádios fenológicos do milho (V4, V8, V12, R1, R3 e R6) e apresentadas na forma de curvas, a produtividade de grãos e a eficiência de uso indireta do N. Os resultados foram submetidos à análise de variância aplicando-se o teste F ($p \leq 0,1$), sendo as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Fischer ($p \leq 0,1$), e usou-se da análise de regressão polinomial. Quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura foram observadas as maiores médias de produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio. Entretanto, a palha de cana-de-açúcar pode ter dificultado a deposição do fertilizante, diminuindo às respostas das plantas de milho à aplicação incorporada do *blend* de U+UREP por efeito salino. A máxima produtividade foi alcançada com 192 kg de N ha^{-1} , independente do modo de aplicação do fertilizante nitrogenado.

Palavras-chave: Fertilizante de liberação controlada; Imobilização; Nitrogênio; Volatilização de amônia

ABSTRACT

Controlled release fertilizers may increase nitrogen (N) use efficiency by agricultural crops. In this context, the objective was to evaluate the application modes and N doses using a blend of conventional urea treated with NBPT and urea coated with elemental sulfur (S^0) and polymers in a sugarcane/maize succession system. The experimental design was a randomized complete block design, in a $(2 \times 4) + 1$ factorial scheme, comprising two modes of application of the fertilizer: in cover and incorporated, combined with four doses of N (75, 150, 225 and 300 kg of N ha^{-1}), of a control treatment (without fertilization with N), with four replicates. The production of dry biomass and the accumulation of N at six corn phenological stages (V4, V8, V12, R1, R3 and R6) were evaluated and presented as curves, grain yield and efficiency of indirect use of N. The results were subjected to analysis of variance by applying the F test ($p \leq 0.1$), the means of the treatments being compared by the Fischer test at ($p \leq 0.1$) and using the polynomial regression analysis for the results of grain yield. When the blend U+UREP was applied under cover, the highest dry biomass and nitrogen accumulation averages were observed. However, sugarcane straw may have a difficult fertilizer deposition, reducing the responses of maize plants to the incorporated application of the blend U+UREP by saline effect. The maximum yield was achieved with 192 kg of N ha^{-1} , regardless of the nitrogen fertilizer application method.

Keywords: Controlled release fertilizers; Immobilization; Nitrogen; Volatilization of ammonia

4.1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o segundo cereal de maior importância no Brasil, cuja safra 2017/18 atingiu 88,6 milhões de toneladas em aproximadamente 16,6 milhões de hectares (CONAB, 2018). Apesar da produção de grãos de milho no Brasil ser significativa em termos de grandeza comparado com outros países produtores do cereal, a produtividade média brasileira é muito baixa, sugerindo que os sistemas de produção podem ser melhorados, especialmente quanto à nutrição mineral (IFA, 2017). Na cultura do milho, o nitrogênio (N) é o nutriente exigido em maior quantidade por ser um componente essencial para a síntese de proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas, fitohormônios, clorofila e inúmeros metabólitos secundários, além de ser o nutriente que mais limita a produtividade de grãos (BLOOM, 2015). Dessa forma, a produção do milho tem grande importância no mercado brasileiro de fertilizantes nitrogenados sintéticos, especialmente pelo uso da ureia (U) (ANDA, 2014).

A U é o fertilizante nitrogenado mais empregado na agricultura mundial, sendo produzida industrialmente pelo processo Haber-Bosch mais de 220 Tg ano⁻¹ de N reativo (FOWLER et al., 2015). Essa fonte se destaca devido a elevada concentração em N (45-46% de N na forma amídica), menor custo por unidade de N no fertilizante, elevada solubilidade em água, facilidade no manuseio e aplicação, boa compatibilidade com outras fontes de nutrientes, disponibilidade imediata de N às plantas, acidificação do solo, entre outros (LARA CABEZAS; KORNDORFER; MOTTA, 1997; KISS; SIMIHÁIAN, 2002; FRAZÃO et al., 2014). Embora a U seja economicamente vantajosa quando comparada a outros fertilizantes nitrogenados, esse fertilizante pode promover impactos agronômicos e ambientais nos agrossistemas, devido a alta susceptibilidade de perdas de N por volatilização de amônia (NH₃) (PAN et al., 2016). Há ainda há a possibilidade de perdas do nutriente nos solos através da lixiviação de nitrato (NO₃⁻), perdas de óxidos de N durante os processos de nitrificação e desnitrificação e, também, por imobilização de N pelos microrganismos do solo.

Devido a elevada demanda de N pela cultura do milho e as perdas de N às quais o uso da U poderá estar sujeito nos sistemas de cultivo, é imprescindível a busca por fertilizantes tecnologicamente aperfeiçoados, denominados de fertilizantes de eficiência aumentada (TRENKEL, 2010; TIMILSENA et al., 2014; NAZ; SULAIMAN, 2016). Esses fertilizantes podem ser classificados conforme as tecnologias utilizadas nos processos de produção em:

fertilizantes nitrogenados estabilizados (NBPT, DCD, DMPP, entre outros); fertilizantes nitrogenados de liberação lenta e fertilizantes nitrogenados de liberação controlada (TRENKEL, 2010; AZEEM et al., 2014; TIMILSENA et al., 2014; GUELFI, 2017).

No grupo dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada, os grânulos solúveis do nutriente dos fertilizantes podem ser revestidos com materiais poliméricos (sintéticos e/ou orgânicos) ou qualquer outro material que lhes conferem melhor resposta agrônoma, servindo de barreira física semipermeável, reduzindo as saídas por difusão do nutriente para o meio externo, atendendo a demanda da cultura a partir da solubilidade gradual do nutriente (AZEEM et al., 2014; TIMILSENA et al., 2015; SNYDER et al., 2017). No entanto, a disponibilização do nutriente aos vegetais pode ocorrer lentamente durante os períodos iniciais de desenvolvimento das plantas, além de possuir preço de mercado elevado em relação aos fertilizantes nitrogenados convencionais (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; FARMAHA; SIMS, 2013). Uma alternativa para reduzir os custos na produção agrícola com uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e melhorar a sincronia na demanda de N pelas culturas, é o seu uso em misturas com fertilizantes nitrogenados convencionais na forma de *blends* (PAYNE et al., 2015; GUELFI, 2017). Assim, trabalhos de pesquisa relatam vantagens no uso de *blends* em comparação a U na China (GUO et al., 2017; ZHENG et al., 2017), Estados Unidos da América (PAYNE et al., 2015) e em diversas regiões pelo mundo (TRENKEL, 2010; SNYDER, 2017). Porém, ainda persistem muitas dúvidas acerca do uso da ureia revestida com polímeros (URP) e/ou de *blends*, existindo, muitas vezes, trabalhos com resultados inconsistentes nas condições tropicais do Brasil.

Assim como as fontes dos fertilizantes nitrogenados a serem utilizados, a forma e o modo de aplicação do N, também, podem influenciar na eficiência de uso do nutriente (FAGERIA; BALIGAR, 2005; AMADO et al., 2013). A aplicação a lanço sobre a superfície do solo é a prática comumente utilizada pelos produtores brasileiros, por apresentar facilidade na aplicação e maior rendimento operacional (KANEKO et al., 2015). Porém, esse modo de aplicação pode resultar em grandes perdas de N por meio da imobilização a curto prazo do nutriente (KONG, 2014). A presença de restos culturais sob a área de cultivo pode aumentar a relação C:N do solo, diminuindo a decomposição dos restos culturais e promover a imobilização líquida do N (VITTI et al., 2007; SHAUKAT et al., 2011; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017), além de favorecer a volatilização de NH_3 (TRIVELIN et al., 2002; MARIANO et al., 2012; OTTO et al., 2017). Uma das alternativas para minimizar as perdas de N em um sistema de cultivo seria o parcelamento da adubação nitrogenada, que é

realizado através da incorporação ao solo de parte do N recomendado para a cultura, permitindo a sincronização entre as aplicações e o período de maior demanda por nutriente pela cultura. Entretanto, os custos com operações mecanizadas são maiores, não havendo, portanto, uma solução clara para o problema (BIESDORF et al., 2016).

Independentemente da fonte do fertilizante nitrogenado ou do modo de aplicação do N no solo (incorporado e/ou cobertura), é desejável que a U seja hidrolisada e o N-fertilizante possa ser absorvido o mais rápido possível pelas plantas (FERRARA et al., 2014). Trabalhos de pesquisa vêm sendo desenvolvidos com a cultura do milho nos últimos anos, porém, existem muitas dúvidas em relação à adubação nitrogenada, especialmente, quando empregado os fertilizantes nitrogenados de liberação controlada. Nesse contexto, objetivou-se avaliar modos de aplicação e doses de N utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo

O estudo foi conduzido na safra agrícola 2016/17 em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho localizado em Severínia, Estado de São Paulo, Brasil (20°76'29'' S, 48°63'95'' W, 598 m de altitude), em um Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (EMBRAPA, 2013), correspondente a um Typic Eustrtox (SOIL SURVEY STAFF, 2014). O clima do local é classificado como zona tropical com estação seca de inverno (Aw) (KÖPPEN, 1948). A área experimental, pertencente ao Grupo Agro-Pastoril Paschoal Campanelli S.A., apresentava um histórico de aproximadamente 15 anos cultivada com citros (*Citrus sinensis* L.), antes de ser convertida em um sistema mecanizado de alta produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). A quantificação de palha de cana-de-açúcar (biomassa seca residual) no local do experimento foi de 17,5 Mg ha⁻¹ (média de amostragens em 1 m² realizadas em cinco pontos aleatórios). Anualmente, cerca de 10 a 15% da área de produção de cana-de-açúcar da propriedade, é plantada com milho com o propósito de renovação do canavial. A produção de grãos nessas áreas destina-se a alimentação de bovinos de corte confinado.

Antes da semeadura do milho de verão foram realizadas amostragens de solo para caracterizar as propriedades químicas e físicas do solo nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m (Tabela 1), sendo analisadas segundo a metodologia descrita por Rajj et al. (2011).

Tabela 1 – Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m na safra agrícola 2016/2017.

Profund.	pH	MO	P _{resina}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB
---- m ----	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----					
0-0,2	5,1	14,0	25,0	1,5	19,0	6,0	18,0	0,0	27,0
0,2-0,4	5,3	5,0	24,0	1,2	18,0	7,0	18,0	0,0	26,0
0,4-0,6	5,3	7,0	11,0	1,0	20,0	9,0	18,0	0,0	30,0
Profund.	V	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Argila	Silte	Areia
---- m ----	- % -	----- mg dm ⁻³ -----					----- % -----		
0-0,2	60	3,0	19,0	1,3	11,6	0,3	17	1	82
0,2-0,4	59	3,0	10,0	0,8	11,8	0,3	23	2	75
0,4-0,6	63	2,1	6,0	0,7	10,7	0,5	32	3	65

MO: matéria orgânica (colorimétrica); P_{resina}: fósforo (método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons); K: potássio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica); Ca e Mg: cálcio e magnésio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica); H+Al: acidez potencial (extraído com tampão SMP); Al: alumínio trocável (método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; V%: saturação por bases; Cu, Fe, Zn e Mn: cobre, ferro, zinco e manganês (extraído com DTPA); B: boro (extraído com água quente).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. A parcela experimental constituiu-se de seis linhas de milho com 20 m de comprimento, plantadas com 0,7 m de espaçamento e regulada para proporcionar uma densidade de 64 mil plantas ha⁻¹, onde a área útil constituiu-se das quatro linhas centrais, de 16 m de comprimento cada, totalizando 44,8 m². Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses totais de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha⁻¹), utilizando um *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (45% de N) e ureia revestida com enxofre elementar (S^o) e polímeros (39% de N), na proporção 30:70, da marca Producote[®] (Patente N^o: EP 0574541 B1) (GOERTZ; TIMMONS; MCVEY, 1992), produzido e comercializado pela Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals com o nome comercial Polyblen[®]. Um tratamento controle sem fertilização com N também foi incluído. Como comentado por Campos et al. (2018) a U tratada com NBPT é altamente solúvel e menos susceptível às perdas de N, atendendo a demanda imediata de N pela cultura, enquanto que a UREP fornece uma liberação gradual de N, garantindo a disponibilidade de N para os estádios posteriores de crescimento e maturação das plantas de milho.

O fertilizante nitrogenado foi aplicado incorporado ao solo ou em cobertura na semeadura do milho. A adubação nitrogenada incorporada foi realizada mecanicamente, com auxílio de uma semeadora acoplada a um trator automatizado controlado por GPS e com disco de corte para abertura do sulco e deposição do fertilizante, sendo esse aplicado na entrelinha da cultura, espaçado a 0,1 m da linha do milho, a uma profundidade de 0,07 m. Para os tratamentos que receberam o N em cobertura, esse foi distribuído manualmente a lanço e em área total em cada parcela experimental.

A calagem foi realizada na superfície do solo, dois meses antes da semeadura do milho, sem incorporação, visando elevar a saturação por bases para 70% (RAIJ et al., 2011). A adubação potássica foi realizada na superfície do solo, três dias antes da semeadura do milho, com a aplicação de 120 kg de K_2O ha^{-1} na forma de cloreto de potássio. A adubação com fósforo foi realizada no momento do plantio com superfosfato simples aplicando-se 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} . A semeadora acoplada ao trator realizou a semeadura do milho simultaneamente à adubação fosfatada em todas as parcelas experimentais e, em seguida, aplicou-se o *blend* de U+UREP nos tratamentos com adubação nitrogenada incorporado ao solo. A aplicação do fertilizante nitrogenado incorporado ao solo foi alterada em função das doses de N, variando o número de rotações do trado do trator em relação à velocidade no solo.

As datas da semeadura e colheita do milho foram, respectivamente, em 5 de dezembro de 2016 e 30 de março de 2017. Foi utilizado o milho híbrido DKB 390 da Dekalb[®] que inclui a tecnologia VT Pro 2 Yield Gard[®] e a tecnologia RoundupReady[®] (DEKALB, 2018). Os tratos culturais foram realizados igualmente nas parcelas experimentais de acordo com o aparecimento de qualquer problema e os dados climáticos (pluviosidade e temperatura) durante a condução do experimento são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Pluviosidade (mm), temperatura máxima e mínima (°C) durante o ciclo da cultura do milho na safra 2016/17. Os dados meteorológicos foram obtidos no posto meteorológico da Estação Experimental de Citricultura de Bebedouro (EECB), distante aproximadamente 50 km da área experimental.

4.2.2 Avaliações e análises estatísticas

As amostragens para produção de biomassa seca (BS) e o acúmulo de N nas plantas do milho foram realizadas nos estádios fenológicos V4, V8, V12, R1, R3 e R6. Foram amostradas quatro plantas por parcela experimental, cortadas rente ao nível do solo e separadas em folhas (folhas + pendão + folhas da espiga) (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G), dependendo do estágio fenológico das plantas. Todo o material foi acondicionado em saco de papel tipo *kraft* e seco em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, até massa constante, para a determinação da produção de BS acima do solo (BRYSON; MILLS, 2015). Posteriormente, o material vegetal seco foi triturado em moinho tipo Willey (Modelo TE-650, TECNAL®, Piracicaba, Brasil), homogeneizado, subamostrado e submetido à determinação da concentração de N por micro digestão Kjeldhal (DOUGLAS; RIAZI, SMITH, 1980). O acúmulo de N em cada parte das plantas foi obtido por meio da multiplicação da concentração de N nos tecidos pela BS de cada parte das plantas e expressado em kg ha⁻¹.

Foram calculadas as taxas máximas de acúmulo de biomassa seca (TMA-BS) e as taxas máximas de acúmulo de N (TMA-N) (kg ha⁻¹ dia⁻¹), utilizando uma função sigmoidal, assim como proposto por Lucchesi (1984). Os valores das máximas taxas de BS acumulada e do N acumulado foram determinados subtraindo o valor no ponto de inflexão (X₀) com o do dia anterior (LAVIOLA et al., 2009)

$$Y = Y_{\max} / (1 + (X/X_0)^B) \text{ ————— (Eq. 3)}$$

Onde Y : é a BS acumulada ou N acumulado na parte aérea do milho ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$); $Y_{\max}$: é máximo acúmulo de BS ou N na parte aérea do milho (kg ha^{-1}); X : corresponde ao período de dias entre a emergência das plantas do milho e o fim do ciclo da cultura; X_0 : consiste no ponto de inflexão correspondente aos dias após a emergências das plantas do milho que ocorreu a máxima taxa de BS acumulada na parte aérea ou de N acumulado; B : é uma constante.

Para a determinação da produtividade de grãos, as espigas de milho foram colhidas manualmente em cinco metros e em duas linhas centrais de cada parcela experimental. As espigas foram debulhadas à mão para separação dos grãos e, em seguida, a produtividade de grãos foi estimada pela pesagem dos grãos e os resultados expressos com a umidade corrigida para 13%, em Mg ha^{-1} , utilizando no cálculo o número de plantas por hectare plantas do experimento.

Foram calculados a eficiência de uso do N pelo milho (EUN) seguindo a proposta de Good; Shrawat; Muench (2004) e Dobermann (2007) para a avaliação da eficiência indireta de uso do nutriente através da eficiência de uso interna (EUI), que corresponde a quantidade de grãos produzidos (kg) pela quantidade de N acumulado na parte aérea do milho no final do ciclo (kg) (equação 2), e a eficiência agrônômica (EA), correspondendo a quantidade de grãos produzidos (kg) pela quantidade de N aplicado (kg) (equação 3).

$$EUI = PGN/NA \text{ ————— (Eq. 2)}$$

$$EA = (PGN - PG0)/DN \text{ ————— (Eq. 3)}$$

Onde a EUI : é a eficiência de uso interna pelo milho (kg kg^{-1}); PGN : é a produtividade de grãos quando adubado com fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); NA : é o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho nos tratamentos que receberam fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); EA : é a eficiência agrônômica do N aplicado (kg kg^{-1}); PGN : é a produtividade de grãos quando adubado com fertilizante nitrogenado (kg ha^{-1}); $PG0$: é a produtividade de grãos nos tratamento controle (kg ha^{-1}); DN : é a dose de N aplicada (kg ha^{-1}).

Os resultados da produção de BS, acúmulo de N e produtividade de grãos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com a adição de um novo fator, criado para

comparar a média do tratamento controle (sem fertilização com N) com a média dos demais tratamentos oriundos da estrutura fatorial. O procedimento PROC GLM do programa estatístico SAS (versão 9.0, SAS Institute Inc. Cary, NC) foi utilizado, onde todos os efeitos de interesse, modo de aplicação e doses de N, foram considerados fixos. Nos casos em que o teste F foi significativo ($p \leq 0,1$), a significância foi interpretada por comparação de médias pelo teste de Fischer (LSD) ($p \leq 0,1$). Quando significativo para as doses de N, foram realizadas análises de regressão linear e quadrática, considerando-se o mesmo intercepto (tratamento controle) no eixo x, independentemente do modo de aplicação do fertilizante nitrogenado. A produção de BS e o N acumulado foram apresentados na forma de curvas e ajustadas por modelo Gaussiano de três parâmetros (equação 4), assim como proposto por Bender et al. (2013), usando o software SigmaPlot® (versão 11.0).

$$Y = A \times \exp \{-0,5 \times ((TD - B)/C^2)\} \text{ ————— (Eq. 4)}$$

Onde Y : é a taxa de produção de BS ou N acumulado (kg ha^{-1}); TD : o período de dias entre a emergência das plantas do milho e o fim do ciclo da cultura; A , B e C : são valores constantes.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os valores da probabilidade (p) do teste de F da análise de variância foi possível observar que não houve interação significativa entre os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado, as doses de N e o tratamento controle (fator novo) para a produção de BS e o acúmulo de N em cada estágio fenológico avaliado, com exceção ao estágio R3 e R6 para o acúmulo de N. Entretanto, houve significância estatística quando comparado apenas o modo de aplicação do fertilizante nitrogenado e o tratamento controle para a produção de BS e o acúmulo de N nos estádios fenológicos V4, V8, V12 e R1. Os valores da probabilidade (p) do teste de F da análise de variância, também, mostraram significância quando comparadas somente as doses de N com o tratamento controle nos estádios V4, R1, R3 e R6 para a produção de BS e nos estádios V4, V12, R1, R3 e R6 para o acúmulo de N. Independente da dose de N avaliada, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura foi observado as maiores médias de produção de BS e acúmulo de N nos estádios V4, V8, V12 e R1. A produção de BS e o acúmulo de N aumentou gradativamente ao longo do ciclo da cultura do milho com o aumento das doses de N, com exceção ao estágio R3 na dose de $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Tabela 2).

Tabela 2 – Produção de biomassa seca (kg ha^{-1}), acúmulo de nitrogênio (kg ha^{-1}) e os valores da probabilidade ($p > F$) do teste de F da análise de variância para o modo de aplicação do fertilizante em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle em cada estágio fenológico durante o ciclo da cultura do milho.

Tratamentos	Estádio fenológico											
	V4	V8	V12	R1	R3	R6	V4	V8	V12	R1	R3	R6
	<u>Produção de biomassa seca (kg ha^{-1})</u>						<u>Acúmulo de nitrogênio (kg ha^{-1})</u>					
Modo de aplicação do fertilizante nitrogenado												
Incorporado	97 b	1806 b	5217 b	12275 b	16222	19337	3,9 b	43,3 b	82,7 b	158,8 b	197,4	238,2
Em cobertura	123 a	2422 a	6416 a	14038 a	17792	20823	5,1 a	57,6 a	103,3 a	177,4 a	203,4	254,8
Doses de nitrogênio (kg ha^{-1})												
75	85,8	1899,4	5291,4	11278,9	16841,5	18472,2	3,5	45,8	75,8	136,3	186,5	221,3
150	103,2	2057,9	5549,3	12720,1	15092,4	19064,7	4,2	47,6	81,4	158,4	151,8	234,9
225	120,1	2094,2	6002,9	13953,2	20457,9	20693,6	4,3	49,7	100,4	172,9	263,5	248,8
300	131,6	2403,2	6421,6	14672,4	15637,3	22089,1	5,0	58,7	114,5	204,8	200,0	281,0
Valor de p												
Novo (N)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N x Modo de aplicação (M)	0,026	0,001	0,016	0,001	0,101	0,113	0,023	<0,001	0,015	0,038	0,557	0,104
N x Doses de nitrogênio (D)	0,063	0,263	0,350	<0,001	0,001	0,037	0,017	0,104	0,006	<0,001	<0,001	0,001
N x M x D	0,612	0,735	0,241	0,485	0,418	0,894	0,823	0,509	0,104	0,591	0,020	0,041
R - linear	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
R- quadrática	0,186	0,128	0,013	<0,001	<0,001	0,001	0,626	0,083	0,141	0,001	<0,001	<0,001
C.V. (%)	32	26	26	12	18	14	36	24	28	17	16	13

Novo (N): fator novo foi criado para verificar o efeito do tratamento controle (sem fertilização com N) *versus* os demais tratamentos.

Modo de aplicação (M): em cobertura ou incorporado.

Doses de nitrogênio (D): 75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1} .

O estudo do comportamento das doses de N e do tratamento controle na produção de BS e acúmulo de N em relação ao modo de aplicação do fertilizante nitrogenado avaliado em cada estágio fenológico são apresentados na Figura 2 e 3. Independente do modo de aplicação do *blend* de U+UREP houve ajuste linear nos estádios V4 e V8 para a produção de BS e no estágio V4 para o acúmulo de N. A aplicação de 262,7 e 268,3 kg de N ha⁻¹, respectivamente, em cobertura e incorporado atingiu o maior acúmulo de N no estágio V8. A máxima produção de BS foi alcançada com a aplicação de 245,8 e 257,2 kg de N ha⁻¹ quando o *blend* de U+UREP foi aplicado, respectivamente, em cobertura e incorporado no estágio V12 e quando houve a aplicação de 248,3 e 242,4 kg de N ha⁻¹ no estágio R1.

Figura 2 – Produção de biomassa seca (kg ha⁻¹) para o modo de aplicação do fertilizante em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle em cada estágio fenológico durante o ciclo da cultura do milho. Os símbolos são os valores observados e as linhas são os valores previstos, a partir do estudo da análise de regressão.

Independente do modo de aplicação do *blend* de U+UREP houve ajuste linear no estágio V12 para o acúmulo de N. No estágio R1, o maior acúmulo do nutriente foi observado nas doses de 278,5 e 294,2 kg de N ha⁻¹ com a aplicação do *blend* de U+UREP em cobertura e incorporado, respectivamente. Ao final do ciclo da cultura (estádio R6), independente do modo de aplicação do fertilizante nitrogenado, a máxima produção de BS (21.824,08 kg ha⁻¹) e acúmulo de N (270,29 kg ha⁻¹) foi alcançado, respectivamente, com as doses de 270,2 e 253,1 kg de N ha⁻¹.

Figura 3 – Acúmulo de N (kg ha⁻¹) para o modo de aplicação do fertilizante em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle em cada estágio fenológico durante o ciclo da cultura do milho. Os símbolos são os valores observados e as linhas são os valores previstos, a partir do estudo da análise de regressão.

A BS e o nitrogênio acumulado ao longo do ciclo da cultura em função das doses de N são apresentadas na forma de curvas ajustadas por modelo matemático (Figura 4). Independente do modo de aplicação do *blend* de U+UREP é possível observar que o milho acumulou BS de forma antecipada logo no estágio V4, enquanto que o tratamento controle acumulou BS próximo ao estágio V8 (Figura 4A e 4B). A partir do estágio V8, os tratamentos que foram fertilizados acumularam BS rapidamente até o estágio R2 e/ou R3, seguido de um declínio no acúmulo até o momento da colheita do milho, devido ao início da translocação do N e carboidratos para a fase de enchimento de grãos (CHEN et al., 2016; SOUFIZADEH et al., 2018). Na média entre os tratamentos que foram fertilizados, a BS acumulada no estágio R6 foi 53,8 e 49,5% superior ao tratamento controle, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura e incorporado, respectivamente. As curvas do N acumulado obteve comportamento semelhante às curvas da BS acumulada, porém, observa-se que a cultura do milho primeiramente acumulou N para posteriormente produzir BS, sendo assim, o acúmulo ocorreu de forma antecipada nos tratamentos fertilizados com N em relação ao tratamento controle (Tabela 3), com maior acúmulo de N até cerca do estágio V12 e VT (pendoamento) em ambos os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado. O acúmulo de N pelo tratamento controle no estágio R6 sempre foi menor correspondendo, em média, valores 64 e 60% inferiores aos tratamentos que foram aplicados N em cobertura e incorporado que acumularam, respectivamente, cerca de 255 e 238 kg de N ha⁻¹.

Tabela 3 – Taxa máxima de acúmulo de biomassa seca (TMA-BS) (kg ha⁻¹ dia⁻¹), dias após a emergência para a ocorrência da TMA-BS (DAE-BS), taxa máxima de acúmulo de nitrogênio (TMA-N) (kg ha⁻¹ dia⁻¹) e dias após a emergência para a ocorrência da TMA-N (DAE-N) em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle em cada estágio fenológico durante o ciclo da cultura do milho.

Tratamentos	DAE-BS	TMA-BS		DAE-N	TMA-N
<u>Incorporado</u>					
Controle	93	180,24		82	1,3
75 kg de N ha ⁻¹	70	433,75		71	4,5
150 kg de N ha ⁻¹	68	276,43		59	2,6
225 kg de N ha ⁻¹	66	591,25		59	4,8
300 kg de N ha ⁻¹	67	335,62		58	4,0
<u>Em cobertura</u>					
Controle	81	150,44		72	1,2
75 kg de N ha ⁻¹	64	381,17		52	2,7
150 kg de N ha ⁻¹	64	427,91		61	3,2
225 kg de N ha ⁻¹	66	558,05		61	4,9
300 kg de N ha ⁻¹	66	336,97		58	3,4

Figura 4 – Biomassa seca acumulada (Figura 4A e 4B) e nitrogênio acumulado (Figura 4C e 4D) em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle em cada estágio fenológico durante o ciclo da cultura do milho.

Com base nas curvas de BS e o nitrogênio acumulado na parte aérea do milho (Figura 4), para cada tratamento, bem como nas taxas máximas de acúmulo e o tempo em dias em que ocorreram essas taxas (Tabela 3), observou-se que a aplicação do *blend* de U+UREP incorporado e em cobertura proporcionaram, respectivamente, TMA-BS variando de 276,4 a 591,2 e 336,9 a 558,0 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Segundo Lucchesi (1984) a TMA-BS representa o incremento de matéria seca por unidade de tempo, sendo classificada como produtividade primária líquida. Os valores obtidos estão dentro do intervalo de 250 a 530 kg ha⁻¹ dia⁻¹ observado por Fischer; Palmer (1980) em variadas condições climáticas. Entretanto, Garcia et al. (2018) avaliando diferentes proporções do *blend* de U+UREP em dois solos distintos, verificaram menores TMA-BS variando de 212 a 240 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Para o acúmulo de N, as maiores taxas máximas de acúmulo de N (TMA-N) foram observadas com a dose de 225 kg de N ha⁻¹ em ambos os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado, sendo que os valores

da TMA-N variam de 2,6 a 4,8 e 2,7 a 4,9 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ quando o *blend* de U+UREP foi incorporado ao solo e aplicado em cobertura, respectivamente. Gava (2003) e Schoninger (2014) estudando doses de N na cultura do milho, observou que as TMA-BS e TMA-N tendem a aumentar com o aumento das doses de N em relação ao tratamento controle. Outro ponto importante que pode ser observado é que a TMA-N ocorreu, em média, 7 dias antes da TMA-BS. Essa observação levanta a questão sobre se não é o acúmulo de N pela planta que impulsiona a produção de BS. Embora vários autores defendam a ideia oposta (CASSMAN et al., 2002; GASTAL; LEMAIRE, 2002), a questão levanta um ponto relevante para discussão e debate, apesar dos processos fisiológicos altamente complexos envolvidos (GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018). Gava et al. (2010), Schoninger (2014), Garcia et al. (2018) e González-Villalba (2018) também verificaram que a TMA-N ocorreu antecipadamente em relação à TMA-BS no sudeste do Brasil. Entretanto, os autores observaram que as TMA-BS e TMA-N ocorreram em um período de tempo menor que o observado, nesse caso, as condições climáticas podem ter contribuído para que as máximas taxas de acúmulo ocorressem de forma tardia.

O sistema de cultivo com sucessão cana-de-açúcar/milho realizado na área experimental teve um aporte de palha de cana-de-açúcar de 17,5 Mg ha⁻¹ que sabe-se ter alta relação C:N (FORTES; TRIVELIN; VITTI, 2012), o que pode favorecer, principalmente, o processo de imobilização do N aplicado devido à atividade microbiana que regula parcialmente a quantidade de N imobilizado (VITTI et al., 2007; SHAUKAT et al., 2011; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017). A imobilização do N provocada pela presença de palha de cana-de-açúcar poderia ter igualado e/ou diminuído a eficiência da adubação nitrogenada, entre as doses de N, na resposta do milho ao acúmulo de BS, em ambos os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado.

Entre a semeadura do milho e a aplicação dos tratamentos com N (sete primeiros dias), houve a ocorrência de chuvas com uma pluviosidade total no período de 31 mm (Figura 1). Essa pluviosidade seria o suficiente para incorporar o fertilizante nitrogenado que foi aplicado em cobertura, hidrolisar e dissolver o N da fonte de N prontamente disponível, presente no *blend* de U+UREP para às plantas de milho, porém o aporte de palha de cana-de-açúcar pode ter prejudicado a incorporação do fertilizante (TRIVELIN et al., 2002). Dessa forma, a umidade proporcionada pelas chuvas no período pode ter favorecido a hidrólise e a solubilização do N prontamente disponível no *blend*, deixando o nutriente susceptível às perdas por volatilização de NH₃ no sistema de cultivo (MARIANO et al., 2012; OTTO et al., 2017), sendo essa uma segunda suposição plausível para justificar a pouca distinção entre as

doses de N no acúmulo de BS. Entretanto, quando o *blend* de U+UREP foi incorporado ao solo, supostamente, a resposta do milho em relação ao acúmulo deveria ser maior pelo simples fato do N não estar susceptível a perda de NH_3 no sistema, o que não foi evidenciado. Dessa forma, é provável que possa ter ocorrido efeito de salinização entre o fertilizante nitrogenado e a semente de milho, uma vez que, o alto aporte de palha de cana-de-açúcar da área experimental pode ter prejudicado a correta deposição do fertilizante nitrogenado no sulco por meio da botina da semeadora.

Zheng et al. (2016) observaram que a produção de BS no trigo na China não apresentou um padrão de acúmulo entre as fases de crescimento quando utilizadas proporções de ureia revestida com enxofre (35% de N) e polímeros (42% de N) e doses de N (150 e 225 kg de N ha⁻¹) em comparação à U em um sistema de sucessão milho/trigo, além de resultados variáveis de uma safra para outra em termos de produção de biomassa. Em condições de clima tropical, González-Villalba (2014) e Garcia et al. (2018) avaliaram diferentes proporções do *blend* de U+UREP em comparação à U utilizando uma dose de 180 kg de N ha⁻¹ na cultura do milho, e constataram que o *blend* de U+UREP não diferiu em produção de BS em relação à U e ao tratamento controle em um Latossolo Vermelho distrófico; entretanto Garcia et al. (2018) evidenciaram que a produção de BS foi maior, porém, igual entre as proporções do *blend* de U+UREP em comparação ao tratamento controle, em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Os resultados de produção de BS desse trabalho e os obtidos por Garcia et al. (2018), mostram que os estudos em relação às fontes, doses e modos de aplicação dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada devem ser intensificados, pois há diversos fertilizantes disponíveis no mercado, com os mais variados tipos de recobrimento e com padrões distintos de liberação de N, que podem ser eficientes ou não em fornecer o nutriente de forma gradual, afetando a resposta da cultura (CAMPOS et al., 2018).

Estudos avaliando a eficiência de fertilizantes nitrogenados revestidos com diferentes tipos de polímeros na cultura do milho em condições de clima tropical têm sido realizados, bem como em outras regiões pelo mundo (TRENKEL, 2010; PAYNE et al., 2015; GUO et al., 2017; SNYDER et al., 2017; ZHENG et al., 2017). Garcia et al. (2018) avaliaram a eficiência da adubação nitrogenada comparando a incorporação da U e diferentes proporções do *blend* de U+UREP em um sistema de produção distinto do presente trabalho, e observaram que o acúmulo do N entre as proporções do *blend* de U+UREP foi de 238 kg de N ha⁻¹, o mesmo valor médio foi observado quando o fertilizante nitrogenado foi incorporado ao solo (238 kg de N ha⁻¹) nas condições de cultivo desse estudo. Em contrapartida, González-Villalba (2018) avaliando o N acumulado, nas mesmas condições de cultivo, observou um

valor próximo a 220 kg de N ha⁻¹ quando incorporado o *blend* de U+UREP ao solo. Por outro lado, Guo et al. (2017) avaliaram duas proporções de um mesmo *blend* de URP (Urea ESN® 44-0-0) utilizando doses distintas de N (180 e 240 kg de N ha⁻¹) que foram aplicadas antes da semeadura do milho em dois anos de cultivo na China, observando um acúmulo, entre as proporções e as doses avaliadas, de 262 kg de N ha⁻¹, quantidade essa muito semelhante (255 kg de N ha⁻¹) quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

A falta de interação entre os fatores estudados para a produção de BS e o acúmulo de N na maioria dos estádios fenológicos avaliados, pode ser devido ao aporte de palha de cana-de-açúcar na área experimental associado às condições climáticas, favorecendo o aumento da umidade no sistema de cultivo, como comentado anteriormente. Em condições de elevada umidade, pode ocorrer o aumento da difusão do nutriente no interior dos grânulos do fertilizante para o meio externo. Dessa forma, o *blend* de U+UREP perderia a capacidade de fornecer N às plantas ao longo do ciclo da cultura do milho e a rápida solubilização e hidrólise do N-ureia proporcionada pela umidade, aumentaria os mecanismos de perda do nutriente e diminuiria a eficiência da adubação em função do aumento das doses no sistema por meio da imobilização e volatilização de NH₃ ocorrendo de forma simultânea. Embora os recentes estudos realizados por Garcia et al. (2018) e González-Villalba (2018) mostraram semelhanças no acúmulo de N quando o fertilizante nitrogenado foi incorporado ao solo, ainda são escassos os estudos envolvendo adubação em cobertura utilizando fertilizantes de eficiência aumentada em condições tropicais, e inexistentes sob palha de cana-de-açúcar, dificultando a comparação de respostas em relação ao modo de aplicação na cultura do milho.

A média da produtividade de grãos (10,6 Mg ha⁻¹) observada foi superior à produtividade média de grãos para milho de primeira safra no Brasil, que é de 5,6 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Os resultados de produtividade de grãos mostraram que não houve interação significativa entre os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado, as doses de N e o tratamento controle (fator novo) ($p \geq 0,7$). Os valores da probabilidade (p) do teste de F, também, mostraram que não houve significância quando comparado apenas o modo de aplicação do fertilizante nitrogenado com o tratamento controle ($p \geq 0,4$) ou quando comparado as doses de N avaliadas com o tratamento controle ($p \geq 0,2$). Sendo assim, os resultados da produtividade de grãos somente foram significativos para o fator novo (tratamento controle) ($p \leq 0,1$), sendo significativo e melhor ajustado pela análise de regressão polinomial de segundo grau ($y = -0,0002x^2 + 0,0777x + 4,8967$; $R^2 = 0,9612$).

Figura 5 – Produtividade de grãos (Mg ha⁻¹) avaliada na colheita mecanizada do milho, em função das doses de nitrogênio e o tratamento controle utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia convencional revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) na safra 2016/17.

Independentemente do modo de aplicação do fertilizantes nitrogenados, a aplicação de 194,2 kg de N ha⁻¹ proporcionou a máxima produtividade de grãos que foi de 12,4 Mg ha⁻¹.

A produtividade de grãos foi influenciada positivamente pelas doses de N em um estudo realizado por Maestrello et al. (2014). Os autores avaliaram a aplicação de U e URP (não sendo especificado o tipo de polímero que foi utilizado para o recobrimento dos grânulos da U) sob sistema de semeadura direta em milho irrigado, alcançando a máxima produtividade com uma dose de 88 kg de N ha⁻¹. Martins et al. (2014) avaliaram as condições, modos de aplicação e doses de URP (KimCoat N[®]) na cultura do milho e aferiram que a URP proporcionou maiores produtividades de grãos em doses acima de 170 kg de N ha⁻¹ (período de verânico) e que o modo de aplicação (em linha ou a lanço em área total) não influenciou na produtividade de grãos. Por sua vez, Valderrama et al. (2014) também verificaram resposta positiva da adubação nitrogenada em relação às doses de N (0, 40, 80 e 120 kg de N ha⁻¹) na produtividade de grãos utilizando ureia revestida por diferentes fontes de polímeros (K-0043 com 43,1% de N, K-0049 com 41,3% de N e K-0055 com 41,3% de N, os fertilizantes foram identificados com esses códigos por não serem produtos comerciais). González-Villalba (2018) mostrou aumento na produtividade de grãos quando o *blend* de U+UREP foi incorporado ao solo em comparação à U no mesmo sistema de cultivo estudado. Enquanto que Garcia et al. (2018) obteve diferença na produtividade de grãos avaliando proporções do *blend* de U+UREP e U em sistemas de cultivo distintos. Os resultados obtidos nesse estudo e

por outros autores acima descritos, envolvendo a adubação nitrogenada estão de acordo com a afirmativa de Coelho (2008), onde 80% dos trabalhos de pesquisa realizados envolvendo doses de N, a cultura do milho respondeu de forma positiva à essa adição.

Embora os resultados pareçam ser positivos utilizando o *blend* de U+UREP para obter a máxima produtividade de grãos na cultura de milho, Maestrelo et al. (2014), Martins et al. (2014) e Valderrama et al. (2014) demonstraram que a ureia revestida por diversos tipos de polímeros não apresentou a eficiência esperada, tendo a produtividade de grãos de milho semelhante à proporcionada pela U ou até se igualando aos tratamentos controle. A eficácia desses fertilizantes depende da solubilidade do revestimento do grânulo e da hidrólise em água, o que regulará o processo de fornecimento dos nutrientes às plantas, sendo que a taxa de liberação e a dissolução desses fertilizantes irão depender do tipo de material que reveste o grânulo (NAZ; SULAIMAN, 2016; GUELF, 2017). Portanto, as respostas do milho em relação a aplicação do *blend* de U+UREP parece depender das condições climáticas, sistema de cultivo e características intrínsecas aos fertilizantes, reforçando-se a necessidade de novos estudos com fertilizantes de eficiência aumentada nas regiões tropicais.

Não houve interação para os índices de EUN entre os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado, as doses de N e o tratamento controle (fator novo) para a EA ($p \geq 0,8$) e EUI ($p \geq 0,6$), e não houve significância quando as fontes de variação foram analisadas isoladamente. Os resultados da EA e EUI foram em média 12,1 e 49,7 kg kg⁻¹, respectivamente. Segundo Dobermann (2007), a EA pode variar de 10 a 30 kg kg⁻¹ em sistemas bem manejados, enquanto que a EUI pode apresentar variações de 30 a 90 kg kg⁻¹, sendo a faixa de 55 a 65 kg kg⁻¹ considerada adequada para proporcionar altas produtividades. Os resultados dos índices de EUN podem pressupor que as perdas de N que podem ter ocorrido no sistema de cultivo por imobilização e volatilização de NH₃, devido ao grande aporte de palha de cana-de-açúcar, juntamente com as condições climáticas, podem ter diminuído a resposta das plantas em função das doses de N avaliadas na produção de BS e acúmulo de N.

4.4 CONCLUSÕES

1. Independente da dose de N avaliada, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura foram observadas as maiores médias de produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio pelo milho cultivado em sucessão à cana-de-açúcar.

2. O alto aporte de palha de cana-de-açúcar pode dificultar a deposição do fertilizante nitrogenado no sulco promovendo efeito salino com a semente, diminuindo às respostas das plantas de milho à aplicação incorporada do *blend* de U+UREP.
3. A aplicação de 194 kg de N ha⁻¹ do *blend* de U+UREP proporcionou a máxima produtividade de grãos de milho (12,4 Mg ha⁻¹), independentemente do modo de aplicação do fertilizante nitrogenado no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

REFERÊNCIAS

- AMADO, T. J. C.; VILLALBA, E. O. H.; BORTOLOTO, R. P.; SANTI, A. L.; LEÓN, E. A. B.; MENEFE, D.; KUNZ, J. Efficiency of Nitrogen Fertilizer Applied At Corn Sowing in Contrasting Growing Seasons in Paraguay. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1641-1650, 2013.
- ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**: 2016. ANDA: São Paulo, 2014. 176p.
- AZEEM, B.; KUSHAARI, K.; MAN, Z. B.; BASIT, A.; THANH, T. H. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, n. 181, p. 11-21, 2014.
- BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; RUFO, M. L.; BELLOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning and remobilization in modern transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n.1, p. 161-170, 2013.
- BIESDORF, E. M.; BIESDORF, E. M.; TEIXEIRA, M. F. F.; DIETRICH, O. H.; PIMENTEL, L. D.; ARAUJO, C. Métodos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em solo de cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 1, p. 44–50, 2016.
- BLOOM, A. J. The increasing importance of distinguishing among plant nitrogen sources. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 25, p. 10-16, 2015.
- BRYSON, G. M.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook IV**: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide. 4 ed. Athens: Micro Macro Publishing, 2015.
- CAMPOS, O. R.; MATTIELLO, E. M.; CANTARUTTI, R. B.; VERGÜTZ, L. Nitrogen release from urea with different coatings. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 2, p. 775-780, 2018.
- CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **Ambio**, v. 31, n. 2, p. 132-140, 2002.
- CHEN, Q.; MU, X.; CHEN, F.; YUAN, L.; MI, G. Dynamic change of mineral nutrient content in different plant organs during the grain filling stage in maize grown under contrasting nitrogen supply. **European Journal of Agronomy**, v. 80, p. 137-153, 2016.

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

COELHO, A. M. Adubação e nutrição do milho. In: CRUZ, J.C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. **A cultura do milho**. 1 ed. Sete Lagoas. Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 517p.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - safra 2017/18 - Sétimo Levantamento**: Brasília: CONAB, 2018, 139p.

DEKALB. **Híbridos de milho: DKB390**. Disponível em: <https://www.dekalb.com.br/pt-br/nossos-produtos/hibridos-milho/verao/DKB-390.html>. Acesso em: 17 abr. 2018.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency measurement and management. In: INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Fertilizer best management practices: general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2007. p. 1-28.

DOUGLAS, L. A.; RIAZI, A.; SMITH, C. J. A semi-micro method for determining total nitrogen in soils and plant material containing nitrate and nitrite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 431-433, 1980.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 97-185, 2005.

FARMAHA, B.S.; SIMS, A.L. The influence of PCU and urea fertilizer mixtures on spring wheat protein concentrations and economic returns. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 5, p. 1328-1334, 2013.

FERRARA, R. M.; LOUBET, B.; DECUQ, C.; PALUMBO, A. D.; TOMASSI, P. DI; MAGLIULO, V.; MASSON, S.; PERSSONE, E.; CELLIER, P.; RANA, G. Ammonia volatilisation following urea fertilisation in an irrigated sorghum crop in Italy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 195-196, p. 179-191, 2014.

FISCHER, K. S.; PALMER, A. F. E. Maize. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, Los Baños, 1980. **Proceedings...** Los Baños: IRRI, 1980. P. 22-26.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 42, p. 189-198, 2012.

FOWLER, D.; STEADMAN, C. E.; STEVENSON, D.; COYLE, M.; REES, R. M.; SKIBA, U. M.; SUTTON, M. A.; CAPE, J. N.; DORE, A. J.; VIENO, M.; SIMPSON, D.; ZAEHLE, S.; STOCKER, B. D.; RINALDI, M.; FACCHINI, M. C.; FLECHARD, C. R.; NEMITZ, E.; TWIGG, M.; ERISMAN, J. W.; BUTTERBACH-BAHL, K.; GALLOWAY, J. N. Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, p. 13849-13893, 2015.

FRAZÃO, J. J.; SILVA, A. R.; SILVA, V. L.; OLIVEIRA, V. A.; CORRÊA, R. S. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 12, p. 1262–1267, 2014.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 370, p. 789-799, 2002.

GAVA, G. J. C. **Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho**. 2003. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências – Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GAVA, G. J. C.; OLIVEIRA, M. W.; SILVA, M. A.; JERÔNIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; TRIVELIN, P. C. O. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de 15 N-uréia. **Semina**, v. 31, n. 4, p. 851-862, 2010

GOERTZ, H. M.; TIMMONS, R. J.; MCVEY, G. R. **Sulfur coated fertilizers and process for the preparation thereof**. US Pat.: EP 0574541 B1, 17 set. 1992.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GOOD, A. G.; SHRAWAT, A. K.; MUENCH, D. G. Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? **Trends in Plant Science**, v. 9, n. 12, p. 597-605, 2004.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15 \text{ Mg ha}^{-1}$) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **Assessment of fertilizer use by crop at the global level**. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

KANEKO, F. H.; ARF, O.; SABUNDJIAN, M. T.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; LEAL, A. J. F.; NASCIMENTO, V. Fontes e modos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em sistema plantio direto. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 2, p. 191-196, 2015.

KISS, S.; SIMIHÁIAN, M. Inorganic compounds tested for evaluation of their inhibiting effect on soil urease activity, urea hydrolysis, ammonia volatilization, and nitrous oxide emission. **Improving efficiency of urea fertilizer by inhibition of soil urease activity**. The Netherlands: Klumer Academic Publishers, 2002. p. 42.

KONG, L. Maize residues, soil quality, and wheat growth in China: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 405-416, 2014.

KÖPPEN, W. **Climatology: a study of the climates of the earth**. Mexico City: Fondo de Cultura Economica, 1948. 233p.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH_3 na cultura do milho: I efeito da irrigação e substituição parcial da UR por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 3, p. 481-487, 1997.

LAVIOLA, B. G.; MARTINEZ, H. E. P.; SOUZA, R. B.; SALOMÃO, L. C. C.; CRUZ, C. D. Macronutrient accumulation in coffee fruits at Brazilian Zona da Mata conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 6, p. 980-995, 2009.

LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 41, p. 181-201, 1984.

MAESTRELO, P. R.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; RODRIGUES, M. A. C.; LINO, A. C. M.; ANDREOTTI, M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 2, p. 192-199, 2014.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; MEGDA, M. X. V.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 450-461, 2013.

MARTINS, I. S.; CAZETTA, J. O.; FUKUDA, A. J. F. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, p. 271-279, 2014.

NAZ, M. Y.; SULAIMAN, S. A. Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. **Journal of Controlled Release**, n. 225, p. 109-120, 2016.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Ciência Rural**, v. 48, n. 3, p. 413-418, 2017.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 232, p. 283-289, 2016.

PAYNE, K. M.; HANCOCK, D. W.; CABRERA, M. L.; LACY, R. C.; KISSEL, D. E. Blending polymer-coated nitrogen fertilizer improved Bermuda grass forage production. **Crop Science**, v. 55, n. 6, p. 2918-2928, 2015.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

SHAUKAT, A. A.; TIAN, X. H.; WANG, X. D.; WU, F. Q.; KUYIDE, J. E. Decomposition characteristics of maize (*Zea mays* L.) straw with different carbon to nitrogen (C/N) ratios under various moisture regimes. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 50, p. 10149-10156, 2011.

SCHONINGER, E. L. **Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura**. 2014. 94p. Tese (Doutorado em Ciências – Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SNYDER, C. S. Enhanced nitrogen fertilizer technologies support the “4R” concept to optimize crop production and minimize environmental losses. **Soil Research**, v. 55, p. 463-472, 2017.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA; Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOUFIZADEH, S.; MUNADO, E.; MCLEAN, G.; MASSIGNAM, A.; VAN OOSTEROM, E. J.; CHAPMAN, S. C.; MESSINA, C.; COOPER, M.; MARTELO, G. L. Modelling the nitrogen dynamics of maize crops – Enhancing the APSIM maize model. **European Journal of Agronomy**, p. 1-14, 2018.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2014.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2015.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n.2, p. 659-670, 2014.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha da cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da biomassa inicial e da adição de vinhaça à superfície do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 76, n.1, p. 135-144, 2017.

ZHENG, W.; ZHANG, M.; LIU, Z.; ZHOU, H.; ZHOU, H.; LU, H.; ZHANG, W.; YANG, Y.; LI, C.; CHEN, B. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. **Fields Crops Research**, v. 197, p. 52-62, 2016.

ZHENG, W.; LIU, Z.; ZHANG, M.; SHI, Y.; ZHU, Q.; SUN, Y.; ZHOU, H.; LI, C.; YANG, Y.; GENG, J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. **Field Crops Research**, v. 205, p. 106-115, 2017.

5. CUSTO E RENTABILIDADE DO USO DE *BLEND* CONTENDO UREIA REVESTIDA COM ENXOFRE ELEMENTAR E POLÍMERO APLICADA EM COBERTURA E INCORPORADA AO SOLO NO RENDIMENTO DO MILHO

RESUMO

O uso de polímeros revestindo grânulos de ureia pode ser uma alternativa de manejo para reduzir perdas de nitrogênio (N) no sistema de cultivo, elevar a produtividade e diminuir os custos de produção, garantindo a sustentabilidade agrícola. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o custo e a rentabilidade de doses de N e modos de aplicação de *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, em esquema fatorial $(2 \times 4) + 1$, compreendendo dois modos de aplicação do fertilizante: em cobertura e incorporado, combinadas com quatro doses de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1}), além de um tratamento controle (sem fertilização com N), com quatro repetições. Foram avaliados o custo operacional total, produtividade de grãos, receita bruta, lucro operacional, índice de lucratividade, produtividade de equilíbrio e preço de equilíbrio. A adubação nitrogenada mostrou-se importante no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho por diminuir o preço de equilíbrio dos tratamentos fertilizados em relação ao tratamento controle, sendo que a aplicação de 300 kg de N ha^{-1} em cobertura proporcionou os maiores valores de produtividade de grãos, receita bruta e custo operacional total. A aplicação incorporada de 150 kg de N ha^{-1} possibilitou o maior lucro operacional (65%) e índice de lucratividade (R\$5.226,10).

Palavras-chave: Custo de produção; Fertilizante nitrogenado revestido; Lucratividade; Modos de aplicação; Nitrogênio

ABSTRACT

The use of polymers coated urea granules may be a management alternative to reduce nitrogen (N) losses in the cropping system, increase productivity and decrease production costs, ensuring agricultural sustainability. In this context, the objective was to evaluate the cost and profitability of N doses and modes of application of blend of conventional urea treated with NBPT and urea coated with elemental sulfur (S^0) and polymers in a sugarcane/maize succession system. The experimental design was a randomized complete block design, in a $(2 \times 4) + 1$ factorial scheme, comprising two modes of application of the fertilizer: in cover and incorporated, combined with four doses of N (75, 150, 225 and 300 kg of N ha^{-1}), of a control treatment (without fertilization with N), with four replicates. The total operating cost, grain yield, gross revenue, operating profit, profitability index, equilibrium productivity and equilibrium price were evaluated. Nitrogen fertilization proved to be important in the sugarcane/corn succession system because it lowered the equilibrium price of the fertilized treatments in relation to the control treatment, and the application of 300 kg of N ha^{-1} in coverage provided the highest values of grain yield, gross revenue and total operating cost. The built-in application of 150 kg of N ha^{-1} made possible higher operating profit (65%) and profitability index (R\$5.226,10).

Keywords: Production cost; Coated nitrogen fertilizer; Profitability; Modes of application; Nitrogen

5.1 INTRODUÇÃO

Para altas produtividades de milho, a curto e a longo prazo, é importante o emprego de tecnologias sustentáveis, como, por exemplo, o sistema de plantio direto, e aplicações de fertilizantes nitrogenados. Nesses sistemas de manejo do solo a presença dos restos culturais sob a área de produção podem aumentar a relação C:N do solo e a necessidade de maiores quantidades de N a serem aplicadas, em função do processo de imobilização líquida do N proveniente dos microrganismos que decompõem a palhada, promovendo competição com o milho, principalmente nos estádios fenológicos iniciais do desenvolvimento da cultura, limitando, assim, a produtividade de grãos (VITTI et al., 2007; SHAUKAT et al., 2011; MARIANO et al., 2013; YAMAGUCHI et al., 2017). Além disso, nesses sistemas de cultivo podem ocorrer outras transformações do N, como a volatilização de amônia (NH₃) (TRIVELIN et al., 2002; MARIANO et al., 2012; OTTO et al., 2017).

A mistura física de grânulos de fertilizantes nitrogenados convencionais (ureia) e/ou estabilizados (ureia convencional tratada com NBPT) com grânulos de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada (fertilizantes de liberação controlada) na forma de *blends* e a aplicação do N no momento da semeadura do milho são alternativas que tem despertado grande interesse dos produtores, visando uma possível diminuição nos custos de produção agrícola com a aquisição desses fertilizantes, além de poder promover o ajuste na curva de liberação do N para o milho em sistemas de cultivo onde possa ocorrer perdas do nutriente (BERTOLINI et al., 2008; PAYNE et al., 2015; GUELFI, 2017). Além disso, algumas vantagens operacionais podem ocorrer, como maior flexibilidade no período de execução da adubação, pelo maior rendimento operacional das máquinas agrícolas, devido a maior facilidade de distribuição a lanço, economia de tempo e de mão de obra e redução no custo operacional das máquinas e no gasto com combustíveis, lubrificantes e reparos (CERETTA, 1998; COELHO; CRUZ; PEREIRA FILHO, 2002; BERTOLINI et al., 2008).

A adubação nitrogenada tem papel importante, como já comentado, por ser o N o nutriente absorvido em maior quantidade pelo milho e por limitar o crescimento e desenvolvimento das plantas, além de deixar o custo de produção mais oneroso (CANTARELLA; DUARTE, 2004). Estudos que possam contribuir para uma indicação mais eficiente, do ponto de vista agrônomo e financeiro, com relação aos modos de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, bem como o sistema de cultivo e a quantidade do N aplicado, são de grande valia para os produtores (GERLACH et al., 2013). Com isso, novas tecnologias foram desenvolvidas, dentre elas, os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada foram

fundamentais para o aumento da produtividade de grãos de milho (HERRENDORF; SCHOELLMAN, 2015; SILVEIRA; BORGES; BUAINAIN, 2005). Como consequência, houve acréscimo nos custos de produção ao longo dos anos e necessidade de uma gestão rural eficiente e eficaz, pois, no geral, os produtores tomam decisões de forma isolada, sobretudo, na produção de milho, que depende fortemente do fornecimento de insumos (ARTUZO et al., 2018). Logo, o controle dos custos e o aumento da produtividade de grãos são fatores que determinam a lucratividade da cultura do milho em uma empresa rural.

A contabilidade do custo de produção constitui-se em uma importante ferramenta para a administração e a tomada de decisão em qualquer ramo do negócio, principalmente na agricultura. Assim, o conhecimento e o controle do custo de produção, dentro de qualquer atividade produtiva, é de fundamental importância para o produtor devido a estreita margem de rentabilidade das culturas e para que tenham sucesso em suas decisões (HORNGREN, 2004; OLIVEIRA; SANTANA; HOMMA, 2012). Qualquer item presente na estrutura do custo de produção tem o potencial para contribuir, de forma significativa, no custo final. Portanto, ao observar os itens alocados nos custos de produção e na receita das atividades, pode-se optar pela melhor alternativa no momento da aquisição dos insumos ou na escolha de uma determinada atividade a ser realizada. A importância da análise dos custos em propriedades rurais deve-se pela utilidade da informação para a tomada da decisão gerencial, a fim de identificar a rentabilidade das atividades agrícolas (MARTIN et al., 1994; BARROS et al., 2006; CARAETO et al., 2006).

A administração rural vem se tornando uma alternativa para a identificação dos principais obstáculos nos sistemas de cultivo, permitindo levantar informações capazes de criar intervenções, a fim de aumentar a sua eficiência. Dessa forma, os sistemas de produção passaram a requerer cada vez mais um alto grau de conhecimento técnico, econômico e administrativo para garantir melhores resultados (ARTUZO et al., 2015; ARTUZO et al., 2018). Diante do exposto, embora o uso e o modo de aplicação dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada pareçam ser eficientes em aumentar a produtividade de grãos de milho, nem sempre esse acréscimo na produtividade é suficiente para cobrir os custos e proporcionar rentabilidade ao produtor, devido ao nível tecnológico empregado que pode impactar no custo de produção da cultura, sendo escassos os estudos que avaliam a sua viabilidade (SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015). Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar o custo e a rentabilidade dos modos de aplicação e doses de N utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Localização, delineamento experimental, tratamentos e manejo

O estudo foi conduzido na safra agrícola 2016/17 em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho localizado em Severínia, Estado de São Paulo, Brasil (20°76'29'' S, 48°63'95'' W, 598 m de altitude). O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico (EMBRAPA, 2013), correspondente a um Typic Eutruxox (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A quantificação de palha de cana-de-açúcar (biomassa seca residual) na área experimental foi de 17,5 Mg ha⁻¹ (média de amostragens em 1 m² realizadas em cinco pontos aleatórios). A classificação climática da região é classificada como zona tropical com estação seca de inverno (Aw), segundo Köppen (1948). A temperatura média máxima e mínima durante o ciclo da cultura do milho foram, respectivamente, 30,9 e 19,5 °C com uma pluviosidade média de 514,4 mm. Os dados meteorológicos foram obtidos no posto meteorológico da Estação Experimental de Citricultura de Bebedouro (EECB), distante a aproximadamente 50 km da área experimental.

Antes da instalação dos experimentos, foram quantificados os atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2011) (Tabela 1).

Tabela 1 – Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m na safra agrícola 2016/2017.

Profund.	pH	MO	P _{resina}	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB
---- m ----	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----					
0-0,2	5,1	14,0	25,0	1,5	19,0	6,0	18,0	0,0	27,0
0,2-0,4	5,3	5,0	24,0	1,2	18,0	7,0	18,0	0,0	26,0
0,4-0,6	5,3	7,0	11,0	1,0	20,0	9,0	18,0	0,0	30,0
Profund.	V	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Argila	Silte	Areia
---- m ----	- % -	----- mg dm ⁻³ -----					----- % -----		
0-0,2	60	3,0	19,0	1,3	11,6	0,33	17	1	82
0,2-0,4	59	3,0	10,0	0,8	11,8	0,28	23	2	75
0,4-0,6	63	2,1	6,0	0,7	10,7	0,45	32	3	65

MO: matéria orgânica (colorimétrica); P_{resina}: fósforo (método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons); K: potássio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica); Ca e Mg: cálcio e magnésio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica); H+Al: acidez potencial (extraído com tampão SMP); Al: alumínio trocável (método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; V%: saturação por bases; Cu, Fe, Zn e Mn: cobre, ferro, zinco e manganês (extraído com DTPA); B: boro (extraído com água quente).

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial (2x4) + 1, a saber: quatro doses de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha⁻¹), além de um tratamento controle (sem fertilização com N) em dois modos de aplicação do fertilizante nitrogenado (em cobertura ou incorporado). O fertilizante nitrogenado utilizado foi um *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (45% de N) e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (39% de N), na proporção 30:70, da marca Producote® (Patente N°: EP 0574541 B1) (GOERTZ; TIMMONS; MCVEY, 1992), produzido e comercializado pela Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals com o nome comercial Polyblen®. A adubação nitrogenada de forma incorporada foi realizada mecanicamente, com auxílio de uma semeadora acoplada a um trator automatizado controlado por GPS e com disco de corte para abertura do sulco e deposição do fertilizante, sendo esse aplicado na entrelinha da cultura, espaçado a 0,1 m da linha da cultura a uma profundidade de 0,07 m. Para os tratamentos que receberam o N em cobertura, esse foi distribuído manualmente a lanço e em área total em cada parcela experimental. As parcelas experimentais foram constituídas de seis linhas de milho com 20 m de comprimento, plantadas com 0,7 m de espaçamento e regulada para proporcionar uma densidade de 64 mil plantas ha⁻¹.

O preparo do solo ocorreu, aproximadamente, dois meses antes da semeadura do milho com a dessecação das plantas de cana-de-açúcar da área experimental. A calagem foi realizada na superfície do solo, sem incorporação, visando elevar a saturação por bases para 70% (RAIJ et al., 2011). A adubação potássica contou com 120 kg de K_2O ha^{-1} na forma de cloreto de potássio, aplicado três dias antes do plantio de milho. A semeadura do híbrido de milho DKB 390 da Dekalb® (DEKALB, 2018) foi realizada mecanicamente no dia 05 de dezembro de 2016 e a adubação de plantio foi realizada com a aplicação de 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} na forma de superfosfato simples. A semeadora acoplada ao trator realizou a semeadura do milho simultaneamente à adubação fosfatada em todas as parcelas experimentais e, em seguida, aplicou-se o *blend* de U+UREP nos tratamentos com adubação nitrogenada de forma incorporada. A taxa de aplicação do N quando incorporado ao solo foi alterada em função das doses de N, variando o número de rotações do trado do trator em relação à velocidade no solo.

5.2.2 Avaliações e análises estatísticas

Para a determinação da produtividade de grãos, as espigas foram colhidas manualmente em cinco metros e em duas linhas centrais de cada parcela experimental no estágio fenológico R6 do milho aos 116 dias após a emergência das plantas. As espigas foram debulhadas à mão para separação dos grãos e, em seguida, a produtividade de grãos foi estimada pela pesagem dos grãos e os resultados foram expressos com a umidade corrigida para 13% em $sc\ ha^{-1}$.

Para o cálculo do custo de produção foi utilizado a estrutura das despesas de custeio da lavoura do milho na região Centro-Sul do Brasil para áreas de alta tecnologia na safra 2016/17, adotada pelo Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária (IMEA, 2016). O custo operacional efetivo (COE) foi composto pelas despesas com a obtenção das sementes do milho, fertilizantes, defensivos agrícolas, operações mecanizadas, mão de obra, depreciação dos bens de capital, assistência técnica e despesas administrativas. Se forem acrescentadas ao COE as despesas com os juros de custeio (considerou-se a taxa de 6,75% a.a. que é a utilizada em operações de crédito rural sobre 50% do COE) e outras despesas (taxa de 5% do total das despesas com o COE), tem-se o custo operacional total (COT). O COT obtido em função das doses de N avaliadas foi utilizado para ambos os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado, considerando que os gastos com as operações mecanizadas e a mão de obra seriam semelhantes entre si.

Para a determinação da análise econômica dos tratamentos avaliados foram calculados os seguintes itens: (1) receita bruta (RB): produto entre a quantidade produzida (em número de sacas de 60 kg) e o preço médio recebido pelo produtor (R\$ ou US\$): $RB = \text{quantidade produzida} \times \text{preço por unidade}$; (2) índice de lucratividade (IL): proporção da receita bruta que se constitui em recursos disponíveis, após a cobertura do custo operacional total de produção (%): $IL = (LO/RB) \times 100$; (3) lucro operacional (LO): diferença entre a receita bruta e o custo operacional total (R\$ ou US\$): $LO = RB - COT$; (4) produtividade de equilíbrio (ProE): é dado como a produtividade mínima necessária para cobrir o COT, considerando-se o preço médio recebido pelo produtor ($sc\ ha^{-1}$): $ProE = COT / \text{preço médio recebido pelo produtor}$; (5) preço de equilíbrio (PE): é dado como o preço mínimo necessário a ser obtido para cobrir o COT, considerando-se a produtividade média obtida pelo produtor ($R\$\ sc^{-1}$ ou $US\$ sc^{-1}$): $PE = COT / \text{produtividade média obtida pelo produtor}$ (MARTIN et al., 1998; KANEKO et al., 2010; GERLACH et al., 2013).

Os valores de produtividade de grãos de cada tratamento avaliado foram convertidos em sacas (sc) de 60 kg de grãos, que é a forma tradicionalmente utilizada na comercialização do milho pelos produtores da região. Os preços médios foram apresentados em reais (R\$) e convertidos em dólares americanos (US\$), considerando o dólar comercial no valor de R\$3,74 (média dos meses de maio, junho e julho de 2018). Para o cálculo do custo do fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada no custo de produção, considerou-se o preço da tonelada do *blend* de U+UREP (39% de N) no valor de US\$616,20 e o preço médio do quilograma do N em US\$1,58 (*Free On Board* – FOB), com base em consulta à empresa fabricante do fertilizante e seus representantes em janeiro de 2018. Considerou-se o preço da tonelada do superfosfato simples e do cloreto de potássio, no valor de US\$155,00 e US\$311,66 (*Free On Board* – FOB), respectivamente, sendo esses valores calculados mediante o levantamento do preço médio nos meses de maio, junho e julho de 2018 (GLOBALFERT, 2018). O preço do milho refere-se ao preço médio da saca (sc) de 60 kg recebido pelos produtores no mesmo período anteriormente citado (US\$9,34), publicados no IEA (2018).

Os preços pagos e recebidos pelos produtores para o milho e os componentes do custo de produção (fertilizantes) corresponderam aos preços médios sem deflação nos meses de maio, junho e julho de 2018. Neste estudo, optou-se por não utilizar alguns preços referentes aos meses e ano de condução do estudo devido à alta flutuação no valor do câmbio do dólar americano, sendo representado por valores atuais de mercado.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontra-se parte da estrutura da estimativa do COT de cada componente do custo de produção obtido com a cultura do milho na região Centro-Sul do Brasil para áreas de alta tecnologia na safra 2016/17, adotada pelo IMEA (2016). A estrutura do modelo do COT foi utilizada individualmente para cada dose de N avaliada. Quanto aos materiais utilizados, os maiores gastos foram atribuídos aos fertilizantes, defensivos agrícolas e aquisição das sementes do milho (34,2%, 23,9% e 20,2%, respectivamente) em comparação aos demais componentes do custo de produção do milho. Os custos com as operações mecanizadas e a mão de obra corresponderam, respectivamente, 6,5% e 4,2% do COT.

A adubação nitrogenada contribuiu, nas doses de 75, 150, 225 e 300 kg ha⁻¹ com 16,1%, 27,5%, 35,9% e 42,4% do COT, respectivamente (Tabela 3). O aumento no COT obtido em função das doses de N pode ser justificado pela diferença na quantidade do nutriente aplicado em cada tratamento e pelo alto preço de mercado do fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada (*blend* de U+UREP). O tratamento sem fertilização com N apresentou o menor COT, devido a inexistência da adubação nitrogenada e do gasto com a aquisição do fertilizante nitrogenado e, também, por diminuir o número de operações com o maquinário agrícola, tendo um custo 45,9% menor quando comparado com o tratamento mais oneroso. São bastantes expressivos os custos da adubação nitrogenada relacionados ao aumento das doses de N, apresentando variação de R\$2.205,96 no COT na maior dose de N avaliada em relação ao tratamento controle. A variação no custo da adubação é impulsionada pela diferença da quantidade do nutriente aplicado nos tratamentos, havendo aumento no COT na ordem de 17,5% do tratamento controle para a dose de 75 kg de N ha⁻¹, 14,9% da dose de 75 kg de N ha⁻¹ para a dose de 150kg de N ha⁻¹, 12,9% da dose de 150 kg de N ha⁻¹ para a dose de 225 kg de N ha⁻¹ e 11,4% da dose anteriormente citada para a dose de 300 kg de N ha⁻¹.

Tabela 2 – Parte da estrutura do custo operacional total (COT) e percentagem (%) de cada componente do custo de produção obtido com a cultura do milho na região Centro-Sul do Brasil para áreas de alta tecnologia na safra agrícola 2016/17, adotada pelo IMEA.

Componentes do custo	Especificação	----- Valor total -----		%
		R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	
Sementes				
Sementes de milho	kg	414,86	110,93	20,29
Fertilizantes				
Fertilizante - Macronutriente	kg	699,94	187,15	34,23
Defensivos				
Fungicida	L	87,99	23,53	4,30
Herbicida	L	237,87	63,60	11,63
Inseticida	L	123,84	33,11	6,06
Adjuvante	L	39,52	10,57	1,93
Operação com máquinas				
Manejo pré-plantio	HM ¹	2,73	0,73	0,13
Adubação e plantio	HM	3,07	0,82	0,15
Aplicações com máquinas	HM	8,89	2,38	0,43
Colheita	HM	32,63	8,72	1,60
Mão de obra	HD ²	86,18	23,04	4,21
Depreciações				
Máquinas e implementos		38,09	10,18	1,86
Benfeitorias e instalações		3,58	0,96	0,18
Assistência técnica	HD	16,10	4,30	0,79
Despesas administrativas	HD	91,66	24,51	4,48
Custo operacional efetivo (COE)		1.886,95	504,53	92,27
Outras despesas (5% do COE)		94,35	25,23	4,61
Juros de custeio		63,68	17,02	3,11
Custo operacional total (COT)		2.044,98	546,78	100,00

HM¹: hora máquina; HD²: homem dia.

Tabela 3 – Estimativa do custo operacional total (COT) e percentagem (%) de cada componente do custo de produção obtido com a cultura do milho, em função das doses de nitrogênio utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) na safra agrícola 2016/17.

Componentes do custo de produção	Controle			Doses de nitrogênio (kg ha ⁻¹)											
				75			150			225			300		
	---- Valor total ----			---- Valor total ----			---- Valor total ----			---- Valor total ----			---- Valor total ----		
	R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	%	R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	%	R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	%	R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	%	R\$ ha ⁻¹	US\$ ha ⁻¹	%
Sementes															
Sementes de milho	414,86	110,93	21,19	414,86	110,93	17,48	414,86	110,93	14,87	414,86	110,93	12,94	414,86	110,93	11,45
Fertilizantes															
Fertilizante nitrogenado	0,00	0,00	0,00	383,94	102,66	16,17	767,88	205,32	27,52	1151,82	307,97	35,93	1535,76	410,63	42,40
Superfósforo simples	386,46	103,33	19,74	386,46	103,33	16,28	386,46	103,33	13,85	386,46	103,33	12,05	386,46	103,33	10,67
Cloreto de potássio	233,12	62,33	11,91	233,12	62,33	9,82	233,12	62,33	8,36	233,12	62,33	7,27	233,12	62,33	6,44
Defensivos															
Fungicida	87,99	23,53	4,49	87,99	23,53	3,71	87,99	23,53	3,15	87,99	23,53	2,74	87,99	23,53	2,43
Herbicida	237,87	63,60	12,15	237,87	63,60	10,02	237,87	63,60	8,53	237,87	63,60	7,42	237,87	63,60	6,57
Inseticida	123,84	33,11	6,33	123,84	33,11	5,22	123,84	33,11	4,44	123,84	33,11	3,86	123,84	33,11	3,42
Adjuvante	39,52	10,57	2,02	39,52	10,57	1,66	39,52	10,57	1,42	39,52	10,57	1,23	39,52	10,57	1,09
Operação com máquinas															
Manejo pré-plantio	2,73	0,73	0,14	2,73	0,73	0,11	2,73	0,73	0,10	2,73	0,73	0,09	2,73	0,73	0,08
Adubação e plantio	3,07	0,82	0,16	3,07	0,82	0,13	3,07	0,82	0,11	3,07	0,82	0,10	3,07	0,82	0,08
Aplicações com máquinas	8,89	2,38	0,45	8,89	2,38	0,37	8,89	2,38	0,32	8,89	2,38	0,28	8,89	2,38	0,25
Colheita	32,63	8,72	1,67	32,63	8,72	1,37	32,63	8,72	1,17	32,63	8,72	1,02	32,63	8,72	0,90
Mão de obra	86,18	23,04	4,40	86,18	23,04	3,63	86,18	23,04	3,09	86,18	23,04	2,69	86,18	23,04	2,38
Depreciações															
Máquinas e implementos	38,09	10,18	1,95	38,09	10,18	1,60	38,09	10,18	1,37	38,09	10,18	1,19	38,09	10,18	1,05
Benfeitorias e instalações	3,58	0,96	0,18	3,58	0,96	0,15	3,58	0,96	0,13	3,58	0,96	0,11	3,58	0,96	0,10
Assistência técnica	16,10	4,30	0,82	16,10	4,30	0,68	16,10	4,30	0,58	16,10	4,30	0,50	16,10	4,30	0,44
Despesas administrativas	91,66	24,51	4,68	91,66	24,51	3,86	91,66	24,51	3,29	91,66	24,51	2,86	91,66	24,51	2,53
Custo operacional efetivo (COE)	1806,59	483,05	92,27	2190,53	676,09	92,27	2574,47	794,59	92,27	2958,41	913,09	92,27	3342,35	1031,59	92,27
Outras despesas (5% do COE)	90,33	24,15	4,61	109,53	33,80	4,61	128,72	39,73	4,61	147,92	45,65	4,61	167,12	51,58	4,61
Juros de custeio	60,97	16,30	3,11	73,93	19,76	3,11	86,88	23,23	3,11	99,84	26,69	3,11	112,80	30,16	3,11
Custo operacional total (COT)	1957,89	523,50	100,00	2373,99	729,65	100,00	2790,07	857,55	100,00	3206,17	985,43	100,00	3622,27	1113,33	100,00

Civardi et al. (2011) estudando a viabilidade da ureia de liberação controlada aplicada superficialmente em comparação com a ureia convencional incorporada ao solo no rendimento do milho para a região Sudoeste de Goiás, na safra 2007/08, verificaram COT de R\$2.186,72 com a aplicação de 234 kg ha⁻¹ (96,4 kg de N ha⁻¹) do fertilizante nitrogenado KimCoat N[®] em cobertura, sendo esse valor abaixo do verificado para as doses a partir de 150 kg de N ha⁻¹ quando utilizado o *blend* de U+UREP. Mota; Mendes; Shirota (2015) avaliaram vários cenários de manejo da adubação nitrogenada e a viabilidade da implantação de diferentes ureias revestidas no cultivo do milho (não sendo especificado o tipo de polímero utilizado no recobrimento dos grânulos da ureia), para o Estado de São Paulo, e concluíram que aplicação de 180 kg de N ha⁻¹ na semeadura proporcionou uma variação de R\$3.021,98 a R\$5.905,98 no COT, devido ao alto preço de mercado dos fertilizantes nitrogenados revestidos avaliados, sendo que os COT obtidos utilizando o *blend* de U+UREP estão condizentes com a faixa de preço do COT obtido pelos autores.

As produtividades de grãos em sacas por hectare (sc ha⁻¹) estão representadas na Tabela 4. A maior produtividade de grãos (234 sc ha⁻¹) foi obtida com a doses de 300 kg de N ha⁻¹ quando o fertilizante nitrogenado foi aplicado em cobertura. Civardi et al. (2011) estudando a aplicação superficial da ureia de liberação controlada (KimCoat N[®]) na dose de 49,4 e 96,4 kg de N ha⁻¹ no município de Jataí em Goiás, na safra 2007/08, com manejo de solo com sistema de plantio direto, verificaram produtividade de grãos de 109,4 e 123,8 sc ha⁻¹, respectivamente. A diferença na produtividade de grãos observado pelos autores com os resultados obtidos foi justificado pela diferença na quantidade do nutriente aplicado, pelo sistema de cultivo e fertilizante nitrogenado utilizado. Na literatura, há trabalhos envolvendo a análise econômica de doses de N (AGUIAR et al., 2008; GERLACH et al., 2013), mas ainda são incipientes os trabalhos que realizam uma comparação econômica envolvendo o modo de aplicação do N utilizando *blend* de ureia convencional tratada NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) no milho.

Mantendo-se constante o preço da saca de milho recebido pelos produtores, as receitas brutas dos tratamentos seguiram a mesma tendência da produtividade de grãos (Tabela 5). Kaneko et al. (2015), estudando a análise econômica do milho em função da inoculação de sementes, fontes e doses de N para a região Leste do Estado do Mato Grosso do Sul, na safra 2011/12, verificaram receita bruta de R\$3.208,50 a R\$5.169,60 para o milho de primeira safra quando utilizado o fertilizante nitrogenado Policote[®] em doses de até 180 kg de N ha⁻¹, aplicado no estágio fenológico V5 e com sementes não inoculadas, sendo esses valores abaixo

Tabela 4 – Produtividade de grãos (sc ha^{-1}) e receita bruta (R\$ e US\$) obtidas com a cultura do milho, em função das doses de nitrogênio e o modo de aplicação do *blend* de ureia tratada tratada com NBPT e ureia crevestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) na safra agrícola 2016/17.

Modo de aplicação do fertilizante	Doses de nitrogênio --- kg ha^{-1} ---	Produtividade de grãos --- sc ha^{-1} ---	Receita bruta	
			----- R\$ -----	----- US\$ -----
Controle	-	76	2.666,83	285,53
U+UREP incorporado	75	160	5.583,87	597,84
	150	207	7.243,22	775,51
	225	217	7.564,23	809,87
	300	199	6.951,16	744,24
	75	181	6.310,88	675,68
U+UREP em cobertura	150	229	8.016,17	858,26
	225	198	6.924,33	741,36
	300	234	8.173,63	875,12

dos observados quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura e/ou incorporado ao solo após a semeadura do milho. Os diferentes valores na receita bruta encontrados na literatura em função de fontes nitrogenadas e doses de N estão associadas às diferenças na produtividade de grãos (sc ha^{-1}) e aos componentes do custo de produção do milho, assim como observado por Artuzo et al. (2018) que estudaram a gestão de custos na produção de milho e soja, verificando que as variáveis pertencentes aos custos de produção do milho estão associadas a receita bruta.

Os valores referentes aos índices de lucratividade e ao lucro operacional foram positivos para todos os tratamentos, independentemente da dose de N ou modo de aplicação do fertilizante nitrogenado avaliado, sendo que o maior índice de lucratividade (65%) e o lucro operacional (R\$5.226,10) foi obtido com a aplicação incorporada de 150 kg de N ha^{-1} do *blend* de U+UREP (Tabela 5). Estudos realizados por Payne et al. (2015) nos Estados Unidos da América com a cultura do milho e de Guo et al. (2017) com produção de forragem na China, comparando o manejo da adubação nitrogenada com diferentes fertilizantes nitrogenados revestidos com polímeros, verificaram efeito positivo desses fertilizantes e a capacidade de proporcionar lucratividade. Entretanto, em um estudo realizado por Mota; Mendes; Shiota (2015) avaliando diferentes ureias revestidas no cultivo do milho em uma dose de 180 kg de N ha^{-1} aplicada em uma única operação logo após a semeadura do milho permitiu verificar que, mesmo com a eliminação dos custos com a adubação de cobertura, as diminuições resultantes nos custos de produção não foi suficiente para tornar viável

Tabela 5 – Índice de lucratividade (%) e lucro operacional (R\$ e US\$) obtidos com a cultura do milho, em função das doses de nitrogênio e o modo de aplicação do *blend* de ureia tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) na safra agrícola 2016/17.

Modo de aplicação do fertilizante	Doses de nitrogênio --- kg ha ⁻¹ ---	Índice de lucratividade ----- % -----	Lucro operacional	
			----- R\$ -----	----- US\$ -----
Controle	-	27	708,94	189,56
U+UREP incorporado	75	57	3.209,88	858,26
	150	61	4.453,15	1.190,68
	225	58	4.358,06	1.165,26
	300	48	3.328,89	890,08
	75	62	3.936,89	1.052,65
U+UREP em cobertura	150	65	5.226,10	1.397,35
	225	54	3.718,16	994,16
	300	56	4.551,36	1.216,94

economicamente o uso desses fertilizantes para o cenário avaliado para o Estado de São Paulo. Dessa forma, maiores estudos avaliando fontes, doses e modos de aplicação de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada devem ser realizados sob as mesmas condições de cultivo desse estudo e em outros sistemas de produção para ser possível a realização de comparação de respostas.

Em relação à produtividade de equilíbrio (produtividade mínima necessária para cobrir os custos), é possível verificar, que, para o preço de R\$18,20 e R\$15,48 por saca de 60 kg de milho, respectivamente, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado incorporado e em cobertura, precisou de maior produtividade de equilíbrio, sendo esta de 104 sc ha⁻¹ para ambos os modos de aplicação do fertilizante nitrogenado. O tratamento sem fertilização com N, precisa da menor produtividade de equilíbrio, sendo, essa de 56 sc ha⁻¹ para cobrir os custos de produção (Tabela 6). Porém, a falta de fornecimento de N em solos cultivados, pode acarretar na diminuição dos seus teores ao longo dos anos, prejudicando, assim, o desenvolvimento da produção ao longo do tempo caso não seja realizada a reposição do nutriente através da adubação (KANEKO et al., 2010). Devido ao elevado preço do fertilizante nitrogenado utilizado (*blend* de U+UREP), houve aumento no valor do COT, sendo responsável pelas maiores produtividades de equilíbrio. À medida em que se aumentam as doses de N, aumentam-se, também, os valores do COT (Tabela 3).

Tabela 6 – Produtividade de equilíbrio (sc ha^{-1}) e preço de equilíbrio ($\text{R\$ sc}^{-1}$ e $\text{US\$ sc}^{-1}$) obtidos com a cultura do milho, em função das doses de nitrogênio e o modo de aplicação do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) na safra agrícola 2016/17.

Modo de aplicação do fertilizante	Doses de nitrogênio --- kg ha^{-1} ---	Produtividade de equilíbrio --- sc ha^{-1} ---	Preço de equilíbrio	
			--- $\text{R\$ sc}^{-1}$ ---	--- $\text{US\$ sc}^{-1}$ ---
Controle	-	56	25,65	6,86
U+UREP incorporado	75	68	14,85	3,97
	150	80	13,45	3,60
	225	92	14,81	3,96
	300	104	18,20	4,87
	75	68	13,14	3,51
U+UREP em cobertura	150	80	12,16	3,25
	225	92	16,17	4,32
	300	104	15,48	4,14

Assim, não só o modo de aplicação do *blend* de U+UREP, mas, também, a quantidade de N aplicada podem interferir nessa variável. Para Mota; Mendes; Shiota (2015), a produtividade de equilíbrio variou de 3,7 a $111,6 \text{ sc ha}^{-1}$ a depender do tipo de fertilizante nitrogenado revestido utilizado em uma dose de $180 \text{ kg de N ha}^{-1}$ aplicados em uma única operação após a semeadura do milho, sendo que as produtividades de equilíbrio obtidas, em função das doses de N e o modo de aplicação do *blend* de U+UREP, estão de acordo com a faixa observada pelos autores.

O preço de equilíbrio é influenciado pelo COT e pela produtividade de grãos. Dessa forma, quanto maior a produtividade de grãos, menor o preço de equilíbrio (GERLACH et al., 2013). De maneira geral, os tratamentos apresentaram comportamento semelhante com exceção ao tratamento sem fertilização com N, sendo o maior preço de equilíbrio proporcionado pelo tratamento controle, e o menor preço de equilíbrio resultou do tratamento com $150 \text{ kg de N ha}^{-1}$ aplicado de forma incorporada ao solo.

5.4 CONCLUSÕES

1. A aplicação do *blend* de U+UREP em cobertura na dose de $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$, proporcionou os maiores valores de produtividade de grãos, receita bruta e custo operacional total.

2. O maior lucro operacional (65%) e, conseqüentemente, índice de lucratividade (R\$5.226,10) foi obtido com a aplicação incorporada de 150 kg de N ha⁻¹ do *blend* de U+UREP.
3. As maiores produtividades de equilíbrio foi obtida as com doses de 300 kg de N ha⁻¹ em ambos os modos de aplicação do fertilizante, devido ao elevado custo de aquisição do fertilizante nitrogenado
4. O aumento nas doses de nitrogênio resultou em tendência de aumento na produtividade de grãos, mostrando a importância da adubação nitrogenada em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho por diminuir o preço de equilíbrio dos tratamentos fertilizados, porém não se mostrou como alternativa economicamente viável.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. A.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A.; WANDER, A. E. Análise econômica de diferentes práticas culturais na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 4, p. 241-248, 2008.
- ARTUZO, F. D.; FOGUESATTO, C. R.; SOUZA, A. R. L.; SILVA, L. X. Gestão de custos na produção de milho e soja. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 20, n. 2, p. 273-294, 2018.
- ARTUZO, F. D.; JANDREY, W. F.; CASARIN, F.; MACHADO, J. A. D. Tomada de decisão a partir da análise econômica de viabilidade: Estudo de caso no dimensionamento de máquinas agrícolas. **Custos e @gronegócio online**, v. 11, n. 3, p. 183-205, 2015.
- BARROS, G. S. A. D. C.; SILVA, A. P.; PONCHIO, L. A.; ALVES, L. R. A.; OSAKI, M.; CENAMO, M. Custos de produção de biodiesel no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 3, p. 36-50, 2006.
- BERTOLINI, E. V.; GAMERO, C. A.; SALATA, A. C.; PIFFER, C. R. Antecipação da adubação de semeadura do milho em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2355-2366, 2008.
- CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J. C. C. & MIRANDA, G. V. **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa: UFV, 2004. p. 139-182.
- CARAETO, E. S.; JAYME, G.; TAVARES, M. P. Z.; VALE, V. P. Gestão estratégica de custos: custos na tomada de decisão. **Revista de Economia da UEG**, v. 2, n. 2, p. 1-24, 2006
- CERETTA, C. A. **Adubação nitrogenada no sistema plantio direto: Sucessão aveia/milho**. In: CONFERÊNCIA ANUAL DE PLANTIO DIRETO, 2., Ijuí, 1998. Anais. Passo Fundo, Aldeia Norte, 1998. p.49-62.

CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Rendimento de milho no Brasil: Chegamos ao máximo.** In: SIMPÓSIO DE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 3., Piracicaba, 2002. Anais. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002. CD-ROM.

DEKALB. **Híbridos de milho: DKB390.** Disponível em: <https://www.dekalb.com.br/pt-br/nossos-produtos/hibridos-milho/verao/DKB-390.html>. Acesso em: 4 jun. 2018.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

GERLACH, G. A. X.; ARF, O.; CORSINI, D. C. D. C.; SILVA, J. C.; COLETTI, A. J. Análise econômica da produção de feijão em função de doses de nitrogênio e coberturas vegetais. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 1, p. 42-49, 2013.

GLOBALFERT®. **Preços matérias-primas (CFR – Paranaguá).** Disponível em: <<https://globalfert.com.br/PrecosMP>>. Acesso em: 11 set. 2018.

GOERTZ, H. M.; TIMMONS, R. J.; MCVEY, G. R. **Sulfur coated fertilizers and process for the preparation thereof.** US Pat.: EP 0574541 B1, 17 set. 1992.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding (>15 Mg ha⁻¹) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

HERRENDORF, B.; SCHOELLMAN, T. Why is measured productivity so low in agriculture? **Review of Economic Dynamics**, v. 18, n. 4, p. 1003-1022, 2015.

HORNGREN, C. T. **Contabilidade de Custos: uma abordagem gerencial.** São Paulo: Pretenci Hall, 2004. 546p.

IEA - Instituto de Economia Agrícola. **Preços médios recebidos pelos agricultores.** Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/nial/precos_medios.aspx?cod_sis=2>. Acesso em: 11 set. 2018.

IMEA - Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Relatórios de mercado: custo de produção do milho – safra 2016/17.** Disponível em: <http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/R410_CPMilho_03_2016.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2018.

KANEKO, F. H.; ARF, O.; GITTI, D. C.; TARSITANO, M. A. A.; RAPASSI, R. M. A.; VILELA, R. G. Custos e rentabilidade do milho em função do manejo do solo e da adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 1, p. 102-109, 2010.

KANEKO, F. H.; SABUNDJIAN, M. T.; ARF, O.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; NASCIMENTO, V.; LEAL, A. J. F. Análise econômica do milho em função da inoculação com *Azospirillum*, fontes e doses de N em cerrado de baixa altitude. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 1, p. 23-37, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatology**: a study of the climates of the earth. Mexico City: Fondo de Cultura Economica, 1948. 233p.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; MEGDA, M. X. V.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; LEITE, J. M.; MEGDA, M. X. V.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Incubation methods for assessing mineralizable nitrogen in soils under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 450-461, 2013.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; ANTUNES, J. F. G.; OLIVEIRA, M. D. M.; OKAWA, H. Custos: Sistema de custo de produção agrícola. **Informações Econômicas**, v. 24, n. 9, p. 97-122, 1994.

MARTIN, N. B.; SERRA, R.; OLIVEIRA, M. D. M.; ÂNGELO, J. A.; OKAWA, H. Sistema "CUSTAGRI": sistema integrado de custo agropecuário. **Informações Econômicas**, v. 28, n. 1, p. 4-7, 1998.

MOTA, E. P.; MENDES, F. L.; SHIROTA, R. Viabilidade de implantação de ureias revestidas no cultivo de milho para Estado de São Paulo. **Revista iPecege**, v.1, n. 1, p. 22-38, 2015.

OLIVEIRA, C. M.; SANTANA, A. C.; HOMMA A. K. O. Os custos de produção e a rentabilidade da soja nos municípios de Santarém e Belterra, Estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 23-32, 2012.

OTTO, R.; ZAVASCHI, E.; SOUZA NETTO, G. J. M.; MACHADO, B. A.; MIRA, A. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers applied to sugarcane straw. **Ciência Rural**, v. 48, n. 3, p. 413-418, 2017.

PAYNE, K. M.; HANCOCK, D. W.; CABRERA, M. L.; LACY, R. C.; KISSEL, D. E. Blending Polymer-Coated nitrogen fertilizer improved Bermuda grass forage production. **Crop Science**, v. 55, n. 6, p. 2918-2928, 2015.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.
SHAUKAT, A. A.; TIAN, X. H.; WANG, X. D.; WU, F. Q.; KUYIDE, J. E. Decomposition characteristics of maize (*Zea mays* L.) straw with different carbon to nitrogen (C/N) ratios under various moisture regimes. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 50, p. 10149-10156, 2011.

SILVEIRA, J. M. F. J. D. BORGES, I. D. C.; BUAINAIN, A. M. Biotecnologia e agricultura: Da ciência e tecnologia aos impactos da inovação. **São Paulo em Perspectiva**, v. 19, n. 2, p. 101-114, 2005.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA; Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; MOREIRA, A. Viabilidade econômica de fontes e doses de nitrogênio no cultivo do milho segunda safra em sistema de plantio direto. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 308-313, 2015.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

YAMAGUCHI, C. S.; RAMOS, N. P.; CARVALHO, C. S.; PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. Decomposição da palha da cana-de-açúcar e balanço de carbono em função da biomassa inicial e da adição de vinhaça à superfície do solo. **Bragantia**, v. 76, n.1, p. 135-144, 2017.

6. FONTES E DOSES DE NITROGÊNIO NA ADUBAÇÃO DE COBERTURA DO MILHO EM SOLO COBERTO POR PALHA DE *Brachiaria ruziziensis*

RESUMO

A eficiência de uso de nitrogênio (EUN) em milho pode ser melhorada utilizando fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o destino do N dentro das plantas de milho proveniente do fertilizante de eficiência aumentada e determinar a sua eficiência, além de avaliar a volatilização de amônia (NH_3) e outros parâmetros de crescimento da planta quando comparados com fertilizantes convencionais. Dois experimentos foram conduzidos nas safras 2016/17 e 2017/18 em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses de N, a saber: 75, 150, 225 e 300 kg de N ha^{-1} , utilizando-se três fertilizantes nitrogenados: ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), que foram aplicados em superfície sobre palha de *Brachiaria ruziziensis*, além de um tratamento controle (sem fertilização com N). Na safra 2016/17 foram instalados câmaras coletoras através de coletores estático aberto nas parcelas experimentais para avaliar a volatilização de NH_3 , além de serem avaliados a produção de biomassa seca (BS) e o acúmulo de N nos estádios fenológicos V4, V8, R1, R3 e R6. Nessa mesma estação de crescimento foram instaladas micro-parcelas de 1,5 m de largura por 1,5 m de comprimento no centro de cada parcela experimental nos tratamentos fertilizados com o *blend* de U+UREP para avaliar o destino do N nas plantas derivado do *blend* ao longo do ciclo de cultivo. Em ambas as safras foram avaliadas a produtividade de grãos e foi realizado um estudo da viabilidade econômica da adubação nesse sistema de cultivo. O *blend* de U+UREP foi capaz de reduzir as perdas cumulativas de NH_3 em relação à U. Na colheita (estádio R6) cerca de 33% da produção de BS consistiu pela massa de grãos e 47% do acúmulo de N ficou alocado nos grãos. A média da produtividade de grãos foi de 9,4 e 12,5 Mg ha^{-1} , respectivamente, nas safras 2016/17 e 2017/18, não sendo observado diferença estatística entre os tratamentos. O N proveniente do solo foi a principal fonte de N para as plantas durante o ciclo de cultivo, sendo que a % NBPTU_{planta} foi de 14% e a % URP_{planta} de 23%.

Palavras-chave: Acúmulo de nitrogênio; Eficiência de uso do nitrogênio; Fertilizante de liberação controlada; Volatilização de amônia

ABSTRACT

The efficiency of nitrogen use (ENU) in maize can be increased using nitrogen fertilizers of increased efficiency. In this context, the objective was to evaluate the fate of N within maize plants from the increased efficiency fertilizer and to determine its efficiency, as well as to evaluate the volatilization of ammonia (N-NH_3) and other growth parameters of the plant when compared with conventional fertilizers. Two experiments were conducted in the 2016/17 and 2017/18 crops in a randomized complete block design, with four replications. The treatments consisted of the application of four doses of N, namely: 75, 150, 225 and 300 kg N ha^{-1} , using three nitrogen fertilizers: conventional urea (U), ammonium nitrate (NA) and *blend* conventional urea coated with NBPT and urea coated with elemental sulfur (S^0) and polymers (U+UREP), which were applied on a surface on straw of *Brachiaria ruziziensis*, in

addition to a control treatment (without fertilization with N). In the 2016/17 harvest, collecting chambers were installed through open static collectors in the experimental plots to evaluate N-NH₃ volatilization, besides the production of dry biomass (DB) and accumulation of N in phenological stages V4, V8, R1, R3 and R6. In the same growing season, micro-plots 1.5 m wide and 1.5 m long were placed in the center of each experimental plot in the treatments fertilized with the blend U+UREP to evaluate the destination of the N derived from the blend throughout the growing cycle. In both harvests grain yield was evaluated and a study of the economic feasibility of fertilization in this cropping system was carried out. The blend U+UREP was able to reduce cumulative losses of NH₃ in relation to U. At harvest (R6 stage) about 33% of the DB production consisted of the grain mass and 47% of the N accumulation was allocated in the grains. The average grain yield was 9,4 and 12,5 Mg ha⁻¹, respectively, in the 2016/17 and 2017/18 crops, and no statistical difference was observed between treatments. N from the soil was the main source of N for the plants during the growing cycle, with the % NBPTU_{plant} was 14% and the % URP_{plant} was 23%.

Keywords: Nitrogen accumulation; Efficiency of nitrogen use; Controlled release fertilizer; Volatilization of ammonia

6.1 INTRODUÇÃO

A recuperação global do nitrogênio (N) de fertilizantes aplicados na produção de cereais de primeira safra é em média 33%, podendo variar de 30 a 50%, cuja recuperação nas safras seguintes é muito limitada (menor que 7% do N aplicado até seis safras consecutivas), ou é perdido no sistema solo-planta-atmosfera, causando sérios distúrbios nas funções dos ecossistemas (LADHA et al., 2005). Pires et al. (2015) estudando as tendências e previsões atuais na eficiência de uso do N (EUN) na produção de cereais no Brasil, relataram que um aumento hipotético de aproximadamente 2,4% na EUN levaria a uma economia de 50.531 toneladas de fertilizantes nitrogenados, representando uma economia de US\$21 milhões em gastos com fertilizantes nitrogenados. Dessa forma, Lassaletta et al. (2014) relataram como o N é crucial para a produtividade das culturas e como mais da metade do N adicionado ao meio de cultivo é perdido para o ambiente, desperdiçando recursos e produzindo ameaças ao ar, à água, ao solo e à biodiversidade, gerando emissões de gases do efeito estufa (GEE) e diminuindo a EUN. Portanto, o manejo da adubação nitrogenada está, muitas vezes, diretamente relacionada com a qualidade ambiental (WEBER; MCCANN, 2015).

O manejo do N têm sido uma das práticas agrícolas mais estudadas no sentido de melhorar a EUN, sendo que os fertilizantes nitrogenados, o tempo e o modo de aplicação desses fertilizantes e as doses de N aplicadas são fatores chave que podem afetar a eficiência de absorção do N na produção agrícola (FAGERIA; BALIGAR, 2005; AMADO et al., 2013). O desafio desse manejo está em aumentar a quantidade do N absorvido pelas plantas e

diminuir o potencial de perdas do nutriente (KANEKO et al., 2015). A recomendação da adubação nitrogenada para a cultura de milho no Estado de São Paulo, Brasil, requer adubação de forma parcelada, sendo que cerca de 20% da dose total recomendada deve ser aplicada no plantio para que ocorra disponibilização do nutriente para os vegetais nos estádios iniciais de crescimento (V4 e V8) (RAIJ et al., 1996). A aplicação dos fertilizantes nitrogenados em milho, geralmente, é realizada a lanço sobre a superfície do solo, sendo essa, a prática de manejo comumente utilizada pelos produtores brasileiros, por apresentar facilidade na aplicação e maior rendimento operacional (KANEKO et al., 2015). Porém, esse modo de aplicação pode resultar na diminuição da EUN por meio da indisponibilização e perdas de N devido a imobilização a curto prazo do nutriente em sistemas de cultivo com palhada (KONG, 2014), além de favorecer a volatilização de amônia (NH_3). Lara Cabezas et al. (2000) observaram maiores perdas de N através da volatilização de NH_3 quando o fertilizante nitrogenado (ureia convencional) foi aplicado na superfície do solo em comparação com a sua incorporação ao solo na cultura do milho. Os autores estimaram que pode haver redução na produtividade de grãos de milho devido à volatilização de NH_3 , na proporção de 10 kg ha⁻¹ de grãos para cada 1% de N volatilizado.

Com relação ao modo de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, a aplicação do N em uma única época (em pré-semeadura ou no momento da semeadura) pode resultar em maior disponibilidade do N mineral no solo nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho (BASSO; CERETTA, 2000), pois a demanda nutricional da planta é pequena na fase inicial de desenvolvimento. Já no período usual de aplicação do N em cobertura (estádio V4 a V8) a absorção do N pelas plantas pode ser mais intensa (RAIJ et al., 1996). A aplicação, antes ou no momento da semeadura, de todo o N recomendado para o milho, tem como principal objetivo aumentar a disponibilidade do N nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura e, assim, reduzir o efeito da imobilização de N pelos microrganismos do solo ao decomporem resíduos culturais de alta relação C:N que podem afetar a EUN. Entretanto, Pöttker; Wiethölter (2004) estudando épocas e modos de aplicação do N na produção de milho cultivado no sistema plantio direto durante um período de cinco anos em Passo Fundo no Rio Grande do Sul, mostraram que a aplicação do N na semeadura e em cobertura proporcionou rendimento de milho estatisticamente semelhante às aplicações realizadas em pré-semeadura e na semeadura.

Além do manejo no modo de aplicação dos fertilizantes, a adoção de fertilizantes nitrogenados considerados de eficiência aumentada é uma alternativa para melhorar a EUN em sistemas agrícolas (TRENKEL, 2010). Nesse sentido, os fertilizantes de liberação

controlada podem melhorar a sincronia na demanda de N pelas culturas (CHALK et al., 2015). Estudos recentes avaliaram o impacto dos fertilizantes de liberação controlada na produtividade de grãos de milho e nas perdas de N em solos no Brasil (GONZÁLEZ-VILLALBA, 2014; CANCELLIER et al. 2016; GARCIA et al., 2018; GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018). Por exemplo, Cancellier et al. (2016) mostraram que a aplicação superficial de ureia revestida com enxofre e polímeros (UREP) resultou em menor volatilização de NH_3 (37% de redução) em comparação à ureia convencional (U), enquanto que a absorção de N e o rendimento de grãos foram semelhantes. Por outro lado, González-Villalba (2018) obteve resultados confirmando a possibilidade de redução das doses de N aplicadas com uso de *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP).

O uso de *blends* na produção agrícola vem sendo adotado por produtores e trabalhos de pesquisa já relataram vantagens no uso em comparação a U como demonstrado por González-Villalba (2018), porém há uma pequena taxa na adoção do fertilizante para culturas extensivas devido ao seu elevado preço, visto que o custo por unidade de N aplicado é mais elevado em comparação à U (CHIEN; PROCHNOW, CANTARELLA, 2009; TRENKEL, 2010; HALVORSON; BARTOLO, 2014). Quando utilizado um *blend* na adubação podem existir incertezas quanto a real fonte de N para as plantas, pois o N absorvido pode advir de uma das fontes do nutriente presente no *blend* ou do N do solo. Como comentado por Chalk et al. (2015) há escassez de dados publicados utilizando técnicas isotópicas com fertilizantes nitrogenados marcados com ^{15}N , apontando para a necessidade de mais estudos que forneçam evidências concretas para o desenvolvimento de novos fertilizantes e com maior eficiência, além de um conjunto de recomendações baseadas em evidências para sua seleção e uso.

Nesse contexto, o objetivo desse estudo foi avaliar o destino do N-fertilizante do *blend* de U+UREP em diferentes órgãos de plantas de milho e determinar a sua eficiência, além de avaliar a volatilização de NH_3 e outros parâmetros de crescimentos da planta quando comparados com a U e o NA em um sistema de sucessão *Brachiaria ruziziensis*/milho.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Localização, manejo, tratamentos e delineamento experimental

O estudo foi realizado nas safras agrícolas de 2016/17 e 2017/18 em lavoura de sequeiro no município Iracemápolis, Estado de São Paulo, Brasil (22°38'47''S, 47°30'12''W e 598 m de altitude) em um Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013), correspondente a um Typic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 2014). O clima desse local é classificado como zona temperada úmida com estação quente de verão (Cfa) em transição para uma zona temperada úmida com estação seca de inverno e quente de verão (Cwa), segundo Köppen (1948) e Alvares et al. (2013). Antes da instalação do experimento, a área foi cultivada com *Brachiaria ruziziensis* e, antes disso, o campo estava sob produção de citros (*Citrus sinensis* L.) por aproximadamente 20 anos. A caracterização química dos atributos do solo foi realizada a partir da amostragem de amostras deformadas compostas, nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, segundo metodologia descrita por Raij et al. (2011) (Tabela 1).

Antes da instalação dos experimentos foi realizada a adubação potássica com a aplicação de 120 kg de K_2O ha^{-1} com cloreto de potássio (KCl), aplicado em superfície, três dias antes da semeadura do milho. A adubação de semeadura foi realizada com a aplicação 120 kg de P_2O_5 ha^{-1} na forma de superfosfato triplo (SPT), feita simultaneamente à semeadura do milho. O adubo fosfatado foi aplicado no sulco de semeadura, aproximadamente 0,07 m abaixo das sementes do milho.

Foi utilizado o híbrido DKB 290 da Dekalb®, que é caracterizado como um híbrido simples modificado, precoce, com uso para grãos e silagem, recomendado para áreas com potencial produtivo com boa resposta ao uso de tecnologia. A semente inclui a tecnologia VT Pro 3®, que confere tolerância moderada às doenças: mancha branca (*Pantoea ananatis*), helmintosporiose (*Exserohilum turcicum*), cercospora (*Cercospora zea-maydis*) e a ferrugem polysora (*Puccinia polysora*) (DEKALB, 2018). A semeadura do milho foi realizada nos dias 15 de dezembro de 2016 e 29 de novembro de 2017, respectivamente, às safras 2016/17 e 2017/18 com auxílio de uma semeadora acoplada a um trator automatizado controlado por GPS, configurada para oito linhas, espaçadas em 0,5 m e regulada para proporcionar uma densidade de 80 mil plantas ha^{-1} .

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC), em um esquema fatorial (3x5) com quatro repetições, totalizando 60 parcelas experimentais. A parcela experimental foi composta por oito linhas de plantas de 12 m de comprimento cada, em que a

área útil se constituiu das quatro linhas centrais, de 8 m de comprimento cada, totalizando 16 m². Os tratamentos constaram da aplicação de quatro doses totais de N (75, 150, 225 e 300 kg de N ha⁻¹), além de um tratamento controle (sem fertilização com N). Os tratamentos foram

Tabela 1 – Características químicas do Latossolo Vermelho nas profundidades 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/2018.

Características	Profundidade (m)					
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
	Safr 2016/17			Safr 2017/18		
pH CaCl ₂	5,0	4,2	4,3	4,7	4,3	4,4
MO (g dm ⁻³)	21,0	14,0	14,0	16,0	11,0	9,0
P _{resina} (mg dm ⁻³)	8,0	10,0	4,0	16,0	5,0	5,0
K (mmol _c dm ⁻³)	3,0	1,3	1,2	2,9	1,4	0,9
Ca (mmol _c dm ⁻³)	24,0	12,0	11,0	21,0	8,0	8,0
Mg (mmol _c dm ⁻³)	8,0	6,0	6,0	6,0	3,0	3,0
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	34,0	52,0	47,0	25,0	34,0	28,0
Al (mmol _c dm ⁻³)	2,0	12,0	10,0	0,0	5,0	2,0
SB (mmol _c dm ⁻³)	35,0	19,0	18,0	29,9	12,4	11,8
CTC (mmol _c dm ⁻³)	69,0	71,0	65,0	54,9	46,4	39,8
V (%)	51	27	28	54	27	30
m (%)	5	38	35	0	29	14
S-SO ₄ (mg dm ⁻³)	28,0	70,0	70,0	63,0	145,0	155,0
Cu (mg dm ⁻³)	1,7	0,8	0,6	1,8	0,9	0,5
Fe (mg dm ⁻³)	17,0	21,0	11,0	13,0	9,0	6,0
Zn (mg dm ⁻³)	1,3	0,4	0,3	0,7	0,3	0,2
Mn (mg dm ⁻³)	3,8	2,3	2,8	6,9	7,1	4,4
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2

MO: matéria orgânica (colorimétrica); P_{resina}: fósforo (método colorimétrico extraído com resina trocadora de íons); K: potássio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de emissão atômica); Ca e Mg: cálcio e magnésio (extração com resina trocadora de íons e determinação em espectrofotômetro de absorção atômica); H+Al: acidez potencial (extraído com tampão SMP); Al: alumínio trocável (método titulométrico extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹); SB: soma de bases; V%: saturação por bases; Cu, Fe, Zn e Mn: cobre, ferro, zinco e manganês (extraído com DTPA); B: boro (extraído com água quente).

aplicados em superfície e distribuídos manualmente a lanço e em área total em cada parcela experimental, e sobre a cobertura de palha da cultura antecessora (*Brachiaria ruziziensis*) em um sistema de cultivo inicial de plantio direto. Os fertilizantes utilizados como fonte de N

foram a ureia convencional (45% de N), nitrato de amônio (32% de N) e um *blend* de ureia convencional tratada com NBPT (45% de N) e ureia revestida com enxofre elementar (S°) e polímeros (39% de N), na proporção 30:70, da marca Producote® (Patente Nº: EP 0574541 B1) (GOERTZ; TIMMONS; MCVEY, 1992), produzido e comercializado pela Produquímica Ind. e Com. – Compass Minerals com o nome comercial Polyblen®.

Os tratos culturais foram realizados igualmente nas parcelas experimentais e os dados climáticos (pluviosidade e temperatura) durante a condução dos experimentos são apresentados na Figura 1.

6.2.2 Volatilização de amônia (NH₃)

No mesmo dia da semeadura do milho foram instaladas câmaras coletoras de volatilização de NH₃ nas parcelas experimentais na safra 2016/17, utilizando um coletor estático aberto modificado de Alves et al. (2011) e Mariano et al. (2012). O coletor aberto foi composto por uma espuma circular de polietileno de 0,15 m de diâmetro e 0,02 m de espessura e com densidade de 28.000 g m⁻³, embebida em 25 mL de solução ácido fosfórico (5 mol L⁻¹ com 5% de glicerina – v/v), a fim de capturar a NH₃ no campo. A espuma foi assentada no interior de uma caixa confeccionada em PVC aberta, em uma das faces (face inferior), com dimensões de 0,14 m de largura, 0,14 m de comprimento e 0,07 m de altura. Os coletores abertos foram posicionados horizontalmente a 0,01 m da superfície do solo (base aberta da caixa de 0,14 x 0,14 x 0,07 m), com o apoio em hastes metálicas (bases) fixadas sob

Figura 1 – Pluviosidade (mm), temperatura máxima e mínima (°C) durante o ciclo da cultura do milho nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18. Os dados meteorológicos foram obtidos no posto meteorológico do Centro de Pesquisa Geraldo Schultz, distante aproximadamente 300 m da área experimental.

o solo. As bases possuíam 0,69 m de comprimento por 0,16 m de largura. O coletor aberto foi movimentado horizontalmente em quatro posições dentro da base, após cada amostragem de espuma. Os fertilizantes nitrogenados foram colocados na parte interna da base em cada parcela correspondente, sobre a palha da *Brachiaria ruziziensis*, sendo que em cada parcela experimental foi instalado apenas um coletor. Cada parcela do tratamento controle também foi monitorada por um coletor aberto. As amostragens e as reposições das espumas para quantificar a NH_3 volatilizada foram realizadas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12, 16, 21, 27, 34, 42, 51 e 61 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Após cada amostragem, as espumas foram devidamente identificadas, armazenadas em sacos plásticos e acondicionadas em congelador (-15 °C), até a avaliação, para evitar a contaminação com a NH_3 do ar atmosférico.

A determinação da quantidade de NH_3 retido nas espumas foi realizada por meio de extração por lavagem com aproximadamente 500 mL de água desionizada. O N-NH_4^+ das amostras foi determinado utilizando o sistema de análise por injeção de fluxo (Flow injection analysis - FIA), onde em meio alcalino ocorre a formação de NH_3 , permeável em membrana hidrofóbica (PTFE), sendo o fluxo direcionado para uma cela de condutividade (REIS et al., 1997). Na interpretação dos resultados de NH_3 volatilizada, as perdas diárias foram subdivididas nos períodos de 0-3, 4-7, 9-16, 16-61 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Seguindo a distribuição temporal das perdas diárias, as perdas cumulativas de

NH₃ foram, também, comparadas em quatro intervalos de tempo aos 3, 7, 16 e 61 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Os resultados da NH₃ volatilizada foram corrigidos através da eficiência ($e = 26\%$) do coletor aberto proposto por Gonzaga; Trivelin (2018).

6.2.3 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio

A produção de biomassa seca (BS) e o acúmulo de N na parte aérea das plantas foram avaliadas em cinco estádios fenológicos do milho na safra 2016/17. A primeira amostragem foi realizada quando as plantas estavam no estágio fenológico V4 (quatro folhas totalmente expandidas) seguido do estágio V8 (oito folhas totalmente expandidas), V12 (oito folhas totalmente expandidas), R1 (embonecamento), R3 (grãos leitosos) e R6 (maturação fisiológica), sendo amostradas em cada estágio quatro plantas por parcela experimental. Quando possível, o material vegetal da parte aérea do milho foi separado em amostras de folhas (folhas + pendão + folhas da espiga) (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G). Todo o material foi acondicionado em saco de papel tipo *kraft* e seco em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, até massa constante (BRYSON; MILLS, 2015). Mensurou-se a BS com o auxílio de uma balança de precisão e os resultados expressos em kg ha⁻¹, utilizando no cálculo o número de plantas por hectare do experimento. O material vegetal seco foi triturado em moinho tipo Willey (Modelo TE-650, TECNAL®, Piracicaba, Brasil), homogeneizado, subamostrado e submetido à determinação da concentração de N por micro digestão Kjeldhal (DOUGLAS; RIAZI, SMITH, 1980). A quantidade de N acumulado em cada parte das plantas foi obtido por meio da multiplicação da concentração de N nos tecidos pela BS de cada parte das plantas e expressado em kg ha⁻¹.

6.2.4 produtividade de grãos, disponibilidade do N mineral no solo (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) e viabilidade econômica

Ao término do ciclo da cultura (estádio R6), foi determinada a produtividade de grãos por meio da colheita manual de cada parcela experimental nos dias 17 de abril de 2017 e 27 de março de 2018, respectivamente, às safras 2016/17 e 2017/18. As espigas foram colhidas em cinco metros e em duas linhas centrais. Os grãos foram pesados e os resultados foram expressos com a umidade corrigida para 13%, em Mg ha⁻¹, utilizando no cálculo o número de plantas por hectare do experimento.

As amostragens de solo para determinação da disponibilidade do N mineral no solo foram realizadas com trado amostrador de solo tipo sonda (Modelo S-60, SONDATERRA®, Piracicaba, Brasil) no local da aplicação dos fertilizantes nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, totalizando três amostras simples por profundidade de solo. A determinação da disponibilidade do N mineral no solo foram realizadas apenas nos tratamentos com *blend* de U+UREP, por meio de seis amostragens ao longo do tempo, concomitantemente à amostragem de plantas para determinação da produção de BS e acúmulo de N.

A extração das formas inorgânicas do N no solo foi realizada em uma subamostra de 5 g com base em massa úmida, à qual se adicionou 25 mL de KCl 2 mol L⁻¹ (relação solo:solução extrato de 1:5 – m/v) (BURESH; AUSTIN; CRASWELL, 1982). Após agitação por uma hora da mistura de solo com a solução extratora em mesa agitadora horizontal, filtrou-se a solução, realizando posteriormente a determinação da concentração do N mineral por meio de sistema de análise por injeção de fluxo (Flow injection analysis - FIA), de acordo com a metodologia de Reis et al. (1997) e Giné et al. (1980). Os resultados da disponibilidade do N mineral no solo (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) foram corrigidos e expressos em peso de terra seca em estufa, após secagem de subamostras de solo a 105 °C em estufa por 48 h.

A determinação da viabilidade econômica foi baseada na técnica da orçamentação parcial descrita por Noronha (1987) e no estudo realizado por Souza, Buzetti; Moreira (2015). Foram determinadas as receitas e os custos adicionais da adubação nitrogenada de cada tratamento, calculando-se: o acréscimo na produtividade de grãos, valor de produção, custo da adubação nitrogenada e a margem de lucratividade.

Os preços médios foram apresentados em reais (R\$) e convertidos em dólares americanos (US\$), considerando o dólar comercial no valor de R\$3,93 (média dos meses de agosto, setembro e outubro de 2018). Considerou-se o preço da tonelada da U e do NA, no valor de US\$295,00 e US\$217,66 (*Free On Board* – FOB), respectivamente, sendo esses valores calculados mediante o levantamento do preço médio no mesmo período anteriormente descrito (GLOBALFERT, 2018). Por ser um fertilizante não convencional, o preço do *blend* de U+UREP não se encontra disponível para consulta.

A partir dos preços da tonelada da U e do NA, foram determinados os preços do quilograma do N em cada fertilizante nitrogenado utilizado. Os custos do quilograma do N proveniente da U (45% de N) e do NA (32% de N) foram, respectivamente, US\$0,64 e US\$0,68. O preço médio do quilograma do N proveniente do *blend* de U+UREP (39% de N) foi calculado em US\$1,58 (*Free On Board* – FOB) com base em consulta à empresa fabricante do fertilizante e seus representantes em janeiro de 2018. O custo da aplicação do N

em cobertura foi calculado em US\$21,00 ha⁻¹ pela média das safras agrícolas 2016/17 e 2017/18 na região Centro-Sul do Brasil, no valor de US\$20,14 ha⁻¹ em dezembro de 2016 (IMEA, 2016) e de US\$21,82 ha⁻¹ em dezembro de 2017 (IMEA, 2017). O preço do milho refere-se ao preço médio da saca de 60 kg recebido pelos produtores nos meses de agosto, setembro e outubro de 2018 (US\$8,98), publicados no IEA (2018). Nesse estudo, optou-se por não utilizar alguns preços referentes aos meses e anos da condução dos estudos devido à alta flutuação no valor do câmbio do dólar americano, sendo representado por valores atuais de mercado.

6.2.5 Determinações de ¹⁵N

Uma micro-parcela de 1,5 m de largura por 1,5 m de comprimento (correspondendo a três linhas de milho) foi instalada no centro de cada parcela experimental nos tratamentos fertilizados com o *blend* de U+UREP. Para isso, foi aplicado nas micro-parcelas uma mistura de ureia convencional tratada com NBPT (UNBPT) marcada com ¹⁵N (com abundância isotópica de 2% de átomos de ¹⁵N) e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (UREP) sem marcação com ¹⁵N, respectivamente, na proporção 30:70, que foi aplicada com a mesma dose de N que o restante da parcela experimental. Duas plantas de cada micro-parcela foram amostradas nas duas linhas externas nos estádios V4, V8, V12, R1 e R3. Na colheita (estádio R6), duas plantas foram amostradas a partir da linha central de cada micro-parcela. Quando possível, o material vegetal da parte aérea do milho foi separado em amostras de folhas (folhas + pendão + folhas da espiga) (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G). Após a separação das frações das plantas, todo o material foi acondicionado em saco de papel tipo *kraft* e seco em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, até massa constante (BRYSON; MILLS, 2015), pesadas com balança de precisão e, posteriormente, o material vegetal seco foi triturado em moinho tipo Willey com peneira de 2 mm (Modelo TE-650, TECNAL®, Piracicaba, Brasil). As determinações de N-total e de abundância de ¹⁵N foram feitas em espectrômetro de massas contendo um analisador automático de N (Modelo ANCA-GSL, 20-20, PDZ Europe, Crewe, GBR) (BARRIE; PROSSER, 1996). As datas das amostragens foram 6 de jan. 2017 (V4), 24 de jan. 2017 (V8), 8 de fev. (V12), 3 de mar. 2017 (R1), 28 de mar. 2017 (R3) e 17 de abr. (2017).

A absorção total de N pelas plantas de milho nos tratamentos controle (sem fertilização com N) foi assumida como o N total derivado do solo (N-Solo) em todos os tratamentos com N-fertilizante. O valor do N-Solo foi utilizado para os tratamentos com

aplicação de fertilizante nitrogenado, supondo que os processos de mineralização-imobilização de N e as outras transformações do nutriente seriam as mesmas para ambas as parcelas fertilizadas e não fertilizadas (RAO et al., 1991). Como apontado no estudo realizado por Stevens; Hoef; Mulvaney (2005a; b) e González-Villalba (2018), o método da diferença utilizado nesse estudo para calcular a quantidade do N derivado da UREP pode superestimar o valor de recuperação do N dessa fonte, devido à omissão do efeito primer do fertilizante nitrogenado aplicado (por exemplo o aumento da mineralização de N pela matéria orgânica do solo). No entanto, essa abordagem pode ser uma ferramenta útil na estimativa da absorção de N pelas plantas de milho quando utilizada duas fontes de N combinadas, além de oferecer um valor aproximado da absorção de N pelo solo.

Com a abundância de átomos de ^{15}N na planta e os valores do N acumulado nas frações das plantas de milho foi realizado o cálculo do N derivado dos fertilizantes. Os resultados foram obtidos usando as equações de 1 a 6.

$$\text{N-UNBPT (\%)} = \frac{(a-b)}{(c-b)} \times 100 \quad \text{--- (Eq. 1)}$$

$$\text{N-UNBPT (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{N-UNBPT (\%)}}{100} \times \text{N acum.} \quad \text{--- (Eq. 2)}$$

$$\text{N-UREP (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{N acum.} - \text{N-UNBPT (kg ha}^{-1}\text{)} - \text{N-Solo} \quad \text{--- (Eq. 3)}$$

$$\% \text{ UNBPT}_{\text{planta}} = \frac{(\text{N-UNBPT (kg ha}^{-1}\text{)} \times 100)}{\text{N acum.}} \quad \text{--- (Eq. 4)}$$

$$\% \text{ UREP}_{\text{planta}} = \frac{\text{N-UREP (kg ha}^{-1}\text{)} \times 100}{\text{N acum.}} \quad \text{--- (Eq. 5)}$$

$$\% \text{ Solo}_{\text{planta}} = \frac{\text{N-solo} \times 100}{\text{N acum.}} \quad \text{--- (Eq. 6)}$$

Onde: *N-UNBPT*: é o nitrogênio na planta derivado da ureia tratada com NBPT (% e kg ha^{-1}); *a*: é a abundância de átomos de ^{15}N nas diferentes frações da planta (folhas, colmo, sabugo e grãos); *b*: é a abundância natural de átomos de ^{15}N nas diferentes frações da planta; *c*: é a abundância de átomos de ^{15}N no fertilizante nitrogenado; *N acum.*: é o nitrogênio acumulado nas diferentes frações da planta (kg de N ha^{-1}); *N-solo*: é o nitrogênio acumulado na planta no tratamento controle (N fornecido pelo solo); *N-UREP*: é o nitrogênio na planta derivado da ureia revestida com enxofre e polímeros (kg ha^{-1}); *% UNBPT_{planta}*: é a porcentagem do N acumulado na planta derivado da ureia tratada com NBPT; *% UREP_{planta}*: é a porcentagem do N acumulado na planta derivado da ureia revestida com enxofre e polímeros; *% Solo_{planta}*: é a

porcentagem do N acumulado na planta derivado da mineralização da matéria orgânica do solo (tratamento controle).

6.2.6 Análises estatísticas

Os resultados da produção de BS, acúmulo de N e produtividade de grãos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando dois fatores fixos: três fertilizantes nitrogenados e cinco doses de N. Em caso de significância para a variável qualitativa foi realizada a comparação de médias pelo teste de Fischer (LSD) ($p \leq 0,1$). Para a variável quantitativa foi realizada à análise de regressão polinomial de primeiro e segundo grau. Os resultados de volatilização de NH_3 , disponibilidade de N mineral no solo e a eficiência do N-fertilizante foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando um único fator fixo que incluiu os tratamentos (fertilizante nitrogenado – dose de N). Em caso de significância foi realizada a comparação de médias pelo teste de Fischer (LSD) ($p \leq 0,1$). Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o programa livre R (R CORE TEAM, 2017).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.3.1 Volatilização de amônia (NH_3)

Durante a safra 2016/17 quando foram instaladas as câmaras coletoras de NH_3 volatilizado do solo ocorreu pluviosidade total de 526 mm no período de cultivo do milho (Figura 1). A umidade ao longo do período de experimentação associado a palhada da cultura antecessora, poderia aumentar a atividade da enzima urease já que essa enzima está diretamente relacionada com a umidade do solo (CANTARELLA, 2007; ROCHETTE et al., 2009), além de poder favorecer tanto a solubilização e a hidrólise dos fertilizantes nitrogenados. Dessa forma, as máximas taxas de perdas de NH_3 foram atingidas no intervalo de 4 a 7 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados (Figura 2A), comportamento semelhante ao observado em outros estudos que indicaram máximo de perdas por volatilização de NH_3 ocorrendo no intervalo de 2 a 8 dias após a aplicação dos fertilizantes (LARA CABEZAS, TRIVELIN; 1990; DA ROS, AITA, GIACOMINI, 2005; SOARES; CANTARELLA, MENEGALE, 2012; CANCELLIER et al., 2016; SILVA et al., 2016). A ocorrência das maiores taxas de perdas de NH_3 nos primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados pode ser explicada pela elevação do pH ao redor dos grânulos da U no período inicial (5 dias), resultante da hidrólise e consumo de prótons durante essa reação

(OVERREIN; MOE, 1967; RODRIGUES; KIEHL, 1992), que pode ter sido influenciada por uma pluviosidade de 9 mm no período. A partir do 7º dia, as taxas de perdas diárias de NH_3 de todos os tratamentos foram reduzindo significativamente, podendo estar relacionado ao pH e à reação de equilíbrio químico do N-amoniaco no solo ($\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$) (TISDALE; NELSON; BEATON, 1985). Após parte do N-NH_4^+ difundido ser retido pela capacidade de troca catiônica do solo (CTC), o pH ao redor dos grânulos tende a se equilibrar com a acidez do solo, especialmente, com a acidez ocasionada pelo processo de nitrificação (WATSON, 2000; SOMMER; SCHJOERRING; DENMEAD, 2004). A estabilização das taxas de perdas diárias de NH_3 somente ocorreu a partir do 21º dia após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados, tornando-se praticamente nulas e não havendo mais diferenças entre os tratamentos.

As taxas de perdas diárias de NH_3 foram afetadas significativamente ($p \leq 0,1$) pelos fertilizantes nitrogenados avaliados nesse estudo (Tabela 2), sendo os picos das taxas de perdas de NH_3 representados em ordem cronológica e decrescente da seguinte forma: U – 300 kg de N ha^{-1} (9,76 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação); U – 225 kg de N ha^{-1} (3,64 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação); U – 150 kg de N ha^{-1} (3,43 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação); U+UREP – 300 kg de N ha^{-1} (1,53 mg dia^{-1} aos 6 dias após a aplicação); U – 75 kg de N ha^{-1} (1,23 mg dia^{-1} aos 6 dias após a aplicação); U+UREP – 225 kg de N ha^{-1} (0,81 mg dia^{-1} aos 6 dias após a aplicação); NA – 300 kg de N ha^{-1} (0,64 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação); NA – 225 kg de N ha^{-1} (0,54 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação); NA – 150 kg de N ha^{-1} (0,52 mg dia^{-1} aos 7 dias após a aplicação); U+UREP – 150 kg de N ha^{-1} (0,51 mg dia^{-1} aos 6 dias após a aplicação); NA – 75 kg de N ha^{-1} (0,27 mg dia^{-1} aos 4 dias após a aplicação); U+UREP – 300 kg de N ha^{-1} (0,23 mg dia^{-1} aos 5 dias após a aplicação).

Figura 2 – Taxas de perdas diárias ($mg\ dia^{-1}$) (2A) e cumulativas (mg) (2B) de $N-NH_3$ volatilizada pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP).

Tabela 2 – Perdas diárias (mg dia⁻¹) de N-NH₃ volatilizada pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP).

Tratamento	Perdas diárias de N-NH ₃ (mg dia ⁻¹)							
	Dia 0 a 3		Dia 4 a 7		Dia 9 a 16		Dia 16 a 61	
U+UREP (75 kg ha ⁻¹)	0,06	d	0,18	f	3,92	ef	13,65	abc
U+UREP (150 kg ha ⁻¹)	0,06	d	0,34	def	5,62	de	9,85	cd
U+UREP (225 kg ha ⁻¹)	0,06	d	0,54	cde	8,28	cd	19,76	ab
U+UREP (300 kg ha ⁻¹)	0,45	bc	0,91	c	9,39	bc	20,22	ab
U (75 kg ha ⁻¹)	0,42	bc	0,68	cd	2,73	f	8,58	cde
U (150 kg ha ⁻¹)	0,71	b	1,83	b	6,29	cd	11,43	bcd
U (225 kg ha ⁻¹)	0,38	bc	2,29	b	13,52	ab	13,41	abc
U (300 kg ha ⁻¹)	1,00	a	4,42	a	16,08	a	21,95	a
NA (75 kg ha ⁻¹)	0,23	cd	0,21	ef	1,08	g	4,84	e
NA (150 kg ha ⁻¹)	0,20	cd	0,32	def	1,90	fg	6,77	de
NA (225 kg ha ⁻¹)	0,42	bc	0,42	def	3,77	ef	7,85	cde
NA (300 kg ha ⁻¹)	0,50	abc	0,48	cdef	3,31	ef	6,36	de
<i>p</i> > F	<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	
CV (%)	38		24		19		23	

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com *p* ≤ 0,1.

Tabela 3 – Perdas cumulativas (mg) de N-NH₃ volatilizada pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP).

Tratamento	Perdas cumulativas de N-NH ₃ (mg)							
	Dia 3		Dia 7		Dia 16		Dia 61	
U+UREP (75 kg ha ⁻¹)	0,18	d	0,88	f	2,53	g	4,42	ef
U+UREP (150 kg ha ⁻¹)	0,20	d	1,56	ef	4,18	efg	5,76	e
U+UREP (225 kg ha ⁻¹)	0,20	d	2,37	def	6,82	de	9,88	cd
U+UREP (300 kg ha ⁻¹)	1,35	bc	4,99	c	9,82	cd	12,97	c
U (75 kg ha ⁻¹)	1,25	bc	3,94	cd	5,36	ef	6,58	de
U (150 kg ha ⁻¹)	2,12	b	9,41	b	12,83	bc	14,50	bc
U (225 kg ha ⁻¹)	1,13	bc	10,29	b	17,07	b	19,39	b
U (300 kg ha ⁻¹)	2,97	a	20,66	a	29,52	a	33,35	a
NA (75 kg ha ⁻¹)	0,69	cd	1,54	ef	2,15	g	2,49	f
NA (150 kg ha ⁻¹)	0,59	cd	1,88	def	2,89	fg	3,78	ef
NA (225 kg ha ⁻¹)	1,25	bc	2,92	cde	4,93	efg	6,16	e
NA (300 kg ha ⁻¹)	1,51	abc	3,43	cde	5,27	ef	6,31	de
<i>p</i> > F	<0,001		<0,001		<0,001		<0,001	
CV (%)	38		22		18		16	

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com *p* ≤ 0,1.

Independente do intervalo de tempo, o fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada foi capaz de reduzir as perdas cumulativas de NH_3 durante todo o experimento em relação à U (Tabela 3). Aos 7 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados, coincidindo com o período crítico para ocorrer as perdas de NH_3 , o *blend* de U+UREP mostrou-se capaz em reduzir significativamente as perdas cumulativas de NH_3 em relação à U, principalmente na dose de 300 kg de N ha^{-1} . O *blend* de U+UREP, possui parte de sua composição composta com ureia convencional tratada com NBPT e, segundo Cantarella (2007) e Campos et al. (2018), o NBPT é altamente solúvel e menos suscetível às perdas de N e é atualmente o inibidor de urease disponível no mercado com resultados mais consistentes, devido a sua similaridade de solubilidade e difusividade com a U. Ao final dos 61 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados foi possível observar que as maiores e menores perdas cumulativas de NH_3 foram obtidas, respectivamente, com a aplicação de U – 300 kg de N ha^{-1} e NA – 75 kg de N ha^{-1} . O fertilizante nitrogenado NA foi o de melhor desempenho em todo o período experimental, independente da dose de N avaliada.

Os resultados obtidos mostram a capacidade dos fertilizantes de eficiência aumentada em possibilitar a maior eficiência de uso do N pela diminuição das perdas do nutriente por volatilização em comparação aos fertilizantes nitrogenados convencionais como a U. Assim, Cancellier et al. (2016), estudando a volatilização de NH_3 por ureia de eficiência aumentada no milho cultivado em solo de Cerrado de fertilidade construída, verificaram atrasos nos máximos de perdas e uma redução de 37% na volatilização de NH_3 com a aplicação de doses de 100, 150 e 200 kg de N ha^{-1} de ureia revestida com enxofre e polímeros (UREP). Entretanto, como há diversos fertilizantes disponíveis no mercado, Zavaschi et al. (2014), estudando a volatilização de NH_3 e componentes da produção do milho com uma única aplicação de URP com 41% de N em Uberlândia, Minas Gerais, na safra 2009/10, verificaram que o uso da URP (não especificado) não resultou em redução nas perdas de NH_3 por volatilização.

Os resultados desse estudo demonstram que mesmo não cessando por completo as taxas de perdas de NH_3 por volatilização, o *blend* de U+UREP, denominado de fertilizante nitrogenado de liberação controlada, foi eficiente em mitigar as perdas de NH_3 , podendo retardar os máximos de perdas de NH_3 , aumentando as chances de incorporação do fertilizante pela ocorrência de chuvas. A “janela de incorporação” obtida pelo efeito temporário do fertilizante de eficiência aumentada é muito importante em sistemas de cultivo com presença de palhada, uma vez que a presença de restos culturais pode potencializar a atividade da enzima urease e servir de barreira física para a incorporação do fertilizante ao

solo (FRENEY et al., 1994; TRIVELIN et al., 2002; DA ROS, AITA, GIACOMINI, 2005; VITTI, 2007; CHENG, 2018). A incorporação do fertilizante pela água das chuvas pode reduzir ainda mais as perdas de NH_3 , pois o maior contato do fertilizante com o solo pode promover o aumento na adsorção do NH_4^+ por cargas negativas (ERNANI, 2008), favorecendo a permanência do N-amoniaco no solo e, por consequência, reduziria as perdas por volatilização de NH_3 (LARA CABEZAS; KORNDÖRFER; MOTTA, 1997).

6.3.2 Produção de biomassa seca e acúmulo de nitrogênio

Em determinados momentos a produção de BS do milho pode ter sido afetada significativamente ($p \leq 0,1$) pelos fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle (Tabela 4). Dessa forma, a ausência da adubação nitrogenada poderia ser um fator limitante para a produção de BS em algum momento. O aumento na produção de BS ocorreu com o estágio fenológico das plantas de milho, praticamente na mesma proporção entre os fertilizantes nitrogenados, e em menor proporção no tratamento controle. A produção de BS acumulada ao fim do ciclo da cultura (estádio R6), mostrou que a aplicação dos fertilizantes nitrogenados não diferiram entre si e do tratamento controle na safra 2016/17.

Na primeira amostragem de plantas (estádio V4) não houve diferença na produção de BS nos tratamentos com fertilizantes nitrogenados, entretanto houve efeito das doses de N, indicando que a disponibilidade do N proveniente do solo pode ter suprido a demanda mínima da planta até esse estágio fenológico e que as perdas por volatilização de NH_3 não foram suficientes para influenciar na produção de BS. A menor alteração na produção de BS através das perdas por volatilização de NH_3 pode estar associada a capacidade de absorção foliar de NH_3 das plantas, podendo atingir 15% do N aplicado em superfície no milho, a depender da área foliar das plantas (SCHONINGER, 2014). No estágio V8, houve interação significativa ($p \leq 0,1$) na produção de BS do colmo entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle, sendo que a aplicação dos fertilizantes nitrogenados diferiram apenas do tratamento controle.

Houve maior produção de BS nas folhas e colmo no estágio V12 nos tratamentos fertilizados com U e *blend* de U+UREP. A adubação nitrogenada é fundamental para a produção de BS nesse estágio vegetativo, uma vez que, de acordo com Magalhães; Durães (20016) é nesse estágio fenológico que as plantas podem atingir cerca de 85 a 90% da área foliar, além de corresponder o período mais crítico para a produção, pois são definidos os números de óvulos (grãos em potencial) em cada espiga, assim como o tamanho da espiga.

No estágio R1 foi possível observar efeito significativo apenas na fração do colmo nos tratamentos fertilizados com U e NA, sendo que a produção de BS proporcionada pelo *blend* de U+UREP se igualou ao tratamento controle. A ausência de respostas na produção de BS nas outras frações do milho pode estar associada com a intensidade e a distribuição das chuvas. Durante os 124 dias do cultivo do milho a pluviosidade foi de 526 mm, com um período de estresse hídrico entre o estágio V12, onde é definido o tamanho da espiga e o potencial dos grãos (MAGALHÃES; DURÃES, 2016) até o início do pendramento (Figura 1). Zhang et al. (2014) afirmaram que o milho é extremamente sensível ao estresse hídrico, em decorrência da alta transpiração, máxima área foliar e aos processos de formação do zigoto e enchimento dos grãos.

No estágio R3 houve efeito significativo e maior distinção dos fertilizantes nitrogenados na produção de BS na fração folha, colmo e sabugo, podendo estar relacionado à translocação dos fotoassimilados presentes nas folhas e no colmo para a espiga e grãos em formação (SOUFIZADEH et al., 2018). A eficiência dessa translocação, além de ser importante para a produção, é extremamente dependente da água (RITCHIE; HANWAY, 1989; FANCELLI, DOURADO NETO, 2000). Na Figura 1, foi possível observar um estresse hídrico nesse estágio, podendo ter prejudicado a eficiência dessa translocação e a produção de grãos.

Na Figura 3 é possível se observar a distribuição e partição da produção de BS no estágio R6 (média entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle e as doses de N), sendo que 33% da BS ficou alocada nas folhas, 29% no colmo, 6% no sabugo e 33% nos grãos do milho. Apesar de existirem diferenças para a produção de BS entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle ao longo do ciclo da cultura, essas diferenças acabaram quando a cultura atingiu o estágio R6 (Tabela 4), em que todos os tratamentos apresentaram médias similares de produção de BS em cada fração (com exceção a fração colmo). Geralmente, a produção de BS deve aumentar à medida que a dose de N do fertilizante aumenta, conforme relatado por vários autores (FERNANDES; LIBARDI, 2012; FRANÇA et al., 2011). No entanto, em alguns casos, quando a resposta ao N é baixa devido ao estresse hídrico (Figura 1), nenhum aumento na produção de BS pode ser observado. A média da produção de BS total de todos os tratamentos no estágio R6 foi de 20.615 kg ha⁻¹, sendo que 6.777 kg ha⁻¹ correspondeu a BS de grãos, equivalendo a 33% da produção de BS total. O valor de 33% para a BS de grãos está abaixo dos valores de índice de colheita relatados na literatura, possivelmente causado pelo estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura do milho. Bender et al. (2013) relataram valores de índice de colheita entre 48 a 54% para seis híbridos

de milho em dois locais em Illinois, Estados Unidos da América. Attia et al. (2015) relataram valores entre 49 a 52 % em um experimento com duração de três anos em Nebraska, Estados Unidos da América. Garcia et al. (2018) e González-Villalba (2018) reportaram, respectivamente, valores médios de 50 e 47% na mesma área experimental avaliando o manejo da adubação nitrogenada em milho, porém em diferentes estações de crescimento. Os resultados obtidos pelos autores indicaram que os híbridos modernos de milho possuem uma maior capacidade em acumular BS e nutrientes (acumulando mais nos grãos), em função dos melhoramentos genéticos realizados para obtenção de maiores produtividades ao longo dos anos. Segundo Berlatto (1992) e Matzenauer et al. (1995), a disponibilidade de água às plantas é o fator que, com maior frequência e intensidade, afeta o rendimento da cultura do milho, o que explicaria não haver diferenças para a produção de BS entre os tratamentos fertilizados e o tratamento controle no estágio R6.

Figura 3 – Distribuição e partição da produção de biomassa seca (3A) e acúmulo de nitrogênio (3B) nas frações folha (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho. Média entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle e as doses de N.

Tabela 4 – Produção de biomassa seca (kg ha⁻¹) de folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) na safras agrícola 2016.

Tratamentos	Estádio fenológico																	
	— V4 —		— V8 —		— V12 —		— R1 —		— R3 —		— R6 —							
	Fração da planta																	
	F	F	C	F	C	F	C	S	G	F	C	S	G	F	C	S	G	Total
Fertilizantes nitrogenados																		
Controle [†]	243	2897	859 b	4809 b	2940 c	6545	4304 b	873	1571	6392 c	4650 b	1099 b	5301	6697	5114 b	1126	7319	20255
U+URP	265	3398	1180 a	5710 a	3633 ab	7043	4584 ab	853	1551	7280 ab	6130 a	1316 a	5859	6600	6097 a	1123	6800	20620
U	268	3705	1350 a	5947 a	3969 a	7180	4834 a	820	1465	7205 a	6282 a	1180 ab	5179	7078	6133 a	1132	6590	20933
NA	283	3307	1204 a	5085 b	3300 b	6937	4792 a	743	1407	7130 b	6599 a	996 b	4293	6828	6298 a	1123	6400	20650
Doses de nitrogênio																		
0 kg ha ⁻¹	243	2897	859	4809	2940	6545	4304	873	1571	9392	4650	1099	5301	6697	5114	1126	7319	20255
75 kg ha ⁻¹	280	3056	1090	5444	3643	7036	4774	815	1653	7119	6057	1238	5998	6365	5738	1140	7387	20630
150 kg ha ⁻¹	285	3265	1112	5545	3682	7104	4805	836	1551	7397	6707	1101	4734	6922	6147	1117	6238	20425
225 kg ha ⁻¹	293	3631	1323	5979	3841	6757	4558	728	1281	7393	6283	1122	4871	7023	6478	1118	6618	21238
300 kg ha ⁻¹	232	3926	1455	5354	3372	7318	4811	842	1413	7712	6302	1194	4838	7032	6339	1128	6144	20643
Valor de <i>p</i>																		
Fertilizantes (F)	0,303	0,170	0,009	0,003	0,002	0,303	0,018	0,567	0,878	0,006	<0,001	0,054	0,139	0,606	0,004	1,000	0,697	0,956
Doses de N (D)	0,032	0,058	0,002	0,041	0,004	0,249	0,041	0,730	0,612	0,020	<0,001	0,770	0,449	0,485	0,002	0,999	0,446	0,953
F x D	0,839	0,309	<0,001	1,000	1,000	0,141	0,114	0,161	0,190	1,000	1,000	0,290	0,756	0,634	1,000	0,451	0,546	0,435
R- linear	0,878	0,003	<0,001	0,050	0,052	0,125	0,065	0,544	0,230	0,002	<0,001	0,801	0,234	0,170	<0,001	0,956	0,109	0,632
R - quadrática	0,002	0,671	0,984	0,027	0,001	0,775	0,160	0,461	0,922	0,311	<0,001	0,945	0,977	0,841	0,089	0,969	0,844	0,788
C.V. (%)	21	28	31	16	17	13	10	32	31	14	15	28	26	15	14	29	31	15

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com $p \leq 0,1$.

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado em cobertura no estágio V4 do milho.

Na Tabela 5 constam os resultados do acúmulo de N nas folhas, colmo, sabugo e grãos das plantas de milho nos estádios fenológicos V4, V8, V12, R1, R3 e R6. Assim como para a produção de BS, o acúmulo de N também foi afetado significativamente ($p \leq 0,1$) em determinados momentos nos diversos estádios fenológicos do milho pelos fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle. As frações colmo e espiga geralmente apresentam os menores valores de acúmulo de N em comparação às folhas e grãos (Figura 3). No entanto, os valores do acúmulo de N dos tratamentos variaram ao longo do ciclo de cultivo pelos fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle e as doses de N. Por exemplo, o tratamento controle (sem fertilização com N) em algumas situações não apresentou os menores valores de acúmulo de N. Por outro lado, os tratamentos com as maiores doses de N (225 e 300 kg de N ha⁻¹) frequentemente apresentaram os maiores valores de acúmulo de N, mas nem sempre.

No estágio V4 houve efeito significativo dos tratamentos fertilizados com U e NA, sendo que o acúmulo de N proporcionado pelo *blend* de U+UREP se igualou ao tratamento controle. O NA, por conter um radical nítrico e outro amoniacal, sofre menores perdas por volatilização de NH₃ e acidifica menos o solo, comparado aos demais fertilizantes nitrogenados (PROCHNOW; ABDALLA, 2007), sendo assim, é possível que as plantas de milho tenham tido maior eficiência de absorção por essa fonte de nutriente. As condições climáticas observadas na área experimental (Figura 1) podem ter estimulado a hidrólise e a solubilização da U, possibilitando, tanto as perdas de por volatilização de NH₃ (Figura 2) como a incorporação do fertilizante e absorção do nutriente pelas plantas, proporcionando maior acúmulo de N pelas plantas de milho.

No estágio V8 e V12 houve maior acúmulo de N nas folhas dos tratamentos fertilizados com U e com o *blend* de U+UREP. A hipótese sugerida para explicar esses resultados, como aventado anteriormente, é de que possa ter ocorrido a hidrólise e a solubilização do N desses fertilizantes, inclusive no *blend* de U+UREP já que essa mistura de fertilizante possui uma fonte de ureia convencional tratada com NBPT prontamente disponível. O acúmulo de N na fração do colmo nessas estádios foi maior quando os tratamentos foram fertilizados com a U. Semelhante a esses resultados, Gava et al. (2010) estudando a produção de fitomassa e acúmulo de N em milho cultivado com diferentes doses de ¹⁵N-uréia no município de Barra Bonita, Estado de São Paulo, relataram que as doses de N afetaram a absorção de N pelas plantas para as diferentes frações das plantas, exceto para a fração do colmo, durante toda a estação de crescimento.

Durante o estágio R1 podem existir duas fontes de N para as plantas, sendo o N absorvido do solo e o N remobilizado pelas plantas (TA; WEILAND, 1992), que será

utilizado na fase de enchimento de grãos. Entretanto, as condições climáticas com restrição hídrica ocorridas nos estádios fenológicos que anteciparam esse evento fisiológico podem ter prejudicado a remobilização do N nas plantas de milho (RITCHIE; HANWAY, 1989; FANCELLI, DOURADO NETO, 2000). Dessa forma, não foi possível observar diferenças no acúmulo de N em todos os tratamentos avaliados nesse estágio.

No estágio R3, houve interação significativa ($p \leq 0,1$) no acúmulo de N na fração do sabugo entre os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle, sendo que a aplicação do *blend* de U+UREP obteve o maior acúmulo de N. Quando os tratamentos foram fertilizados com o *blend* de U+UREP, também, foram observados maiores acúmulos de N nas folhas, colmo e grãos. Além disso, é possível observar um resultado atípico no acúmulo de N na fração sabugo e grãos nos tratamentos fertilizados com NA, sendo observado um menor acúmulo de N em comparação ao tratamento controle, possivelmente, esses resultados estão associados com a disponibilidade do N mineral do solo.

O acúmulo de N nas folhas foi diminuindo ao longo do ciclo da cultura (Figura 3 e Tabela 5) devido à translocação de fotoassimilados, sugerindo que a produção de BS pode ter uma influência maior no acúmulo de N da planta inteira do que às doses de N, assim como demonstrado por Gastal; Lemaire (2002) e González-Villalba (2018). Dessa forma, o acúmulo de N total pelas plantas de milho possivelmente pode mostrar uma relação linear com a produção de BS total da planta (GASTAL; LEMAIRE, 2002; CIAMPITTI; VYN, 2011; GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018). A fração do colmo e sabugo no estágio R6 correspondeu, respectivamente, 19 e 4% do acúmulo de N total da planta, demonstrando um baixo, mas importante reservatório de N para o processo de ciclagem do nutriente no solo após a colheita, já que essas frações permanecem na área de plantio após a colheita. A média do acúmulo de N total de todos os tratamentos no estágio R6 foi de 289 kg de N ha⁻¹, sendo que 136 kg de N ha⁻¹ correspondeu ao acúmulo dos grãos, equivalendo a 47% do acúmulo de N total, representando um índice de colheita de N abaixo da faixa de 51 a 61% (média de 58%) relatado por Bender et al. (2013) e aos valores médios de 56 a 68% e 59% encontrados por Schoninger (2014) e González-Villalba (2018), respectivamente. Como comentado anteriormente, a disponibilidade de água às plantas provavelmente foi o fator que prejudicou o processo de translocação de fotoassimilados e a produção de grãos (RITCHIE; HANWAY, 1989; BERLATO, 1992; MATZENAUER et al., 1995; FANCELLI, DOURADO NETO, 2000).

Tabela 5 - Acumulo de nitrogênio (kg ha^{-1}) nas folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) na safras agrícola 2016.

Tratamentos	Estádio fenológico																	
	— V4 —		— V8 —		— V12 —		— R1 —			— R3 —			— R6 —					
	Fração da planta																	
	F	F	C	F	C	F	C	S	G	F	C	S	G	F	C	S	G	Total
Fertilizantes nitrogenados																		
Controle [†]	10,6 b	79,0 c	16,0 c	90,5 c	29,4 c	107,8	47,2	11,2	33,5	80,5 b	36,3 b	9,3 ab	93,0 b	71,1 b	34,6 b	11,3	151,4	268,5
U+URP	12,3 ab	99,1 a	23,6 ab	139,6 a	39,6 b	112,8	49,7	11,4	34,0	106,6 a	57,4 a	11,7 a	115,9 a	88,0 a	57,1 a	10,1	136,6	292,0
U	13,3 a	107,1 a	27,3 a	139,1 a	46,1 a	115,8	52,5	12,7	32,9	113,7 a	60,9 a	10,2 b	101,9 ab	97,6 a	58,1 a	11,3	130,8	298,0
NA	13,0 a	98,9 a	22,8 b	117,6 b	41,3 ab	111,7	55,0	11,3	31,7	106,2 a	65,7 a	8,6 c	82,7 b	93,5 a	65,4 a	11,2	126,1	296,2
Doses de nitrogênio																		
0 kg ha ⁻¹	10,6	79,0	16,0	90,5	29,4	107,8	47,2	11,2	33,5	80,5	36,3	9,3	93,0	71,1	34,6	11,3	151,4	268,5
75 kg ha ⁻¹	12,6	82,9	21,0	129,0	39,5	102,5	53,5	11,4	36,2	94,7	52,2	9,5	121,5	81,1	41,6	10,5	145,7	279,0
150 kg ha ⁻¹	14,2	92,0	22,6	128,0	44,4	117,2	47,6	12,1	35,2	107,8	56,3	9,2	93,1	99,5	60,7	10,9	123,0	294,3
225 kg ha ⁻¹	13,5	106,4	26,0	140,0	44,2	117,5	48,0	10,0	30,4	118,5	64,1	9,8	92,0	93,4	66,1	11,1	131,7	302,4
300 kg ha ⁻¹	11,1	125,5	28,6	131,4	41,2	116,5	60,5	13,7	29,6	114,2	71,9	12,1	94,2	98,2	72,5	10,9	124,2	305,8
Valor de <i>p</i>																		
Fertilizantes (F)	0,078	0,097	0,001	<0,0001	0,001	0,747	0,151	0,569	0,970	<0,001	<0,001	0,003	0,089	0,001	<0,001	0,780	0,481	0,495
Doses de N (D)	0,014	0,001	<0,001	0,001	0,006	0,215	0,004	0,104	0,730	<0,001	<0,001	0,022	0,238	<0,001	<0,001	0,988	0,405	0,412
F x D	1,000	0,554	1,000	1,000	1,000	0,253	0,186	0,195	0,121	1,000	1,000	0,039	0,392	1,000	1,000	0,794	1,000	0,955
R- linear	0,458	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	0,072	0,017	0,236	0,294	<0,001	<0,001	0,008	0,425	<0,001	<0,001	0,920	0,094	0,056
R - quadrática	0,001	0,258	0,665	0,003	0,008	0,782	0,072	0,269	0,489	0,057	0,138	0,054	0,529	0,064	0,386	0,821	0,562	0,719
C.V. (%)	23	30	30	19	26	17	18	28	27	18	28	23	27	19	29	34	32	19

Médias seguidas por letras distintas, dentro de cada coluna, diferem entre si pelo teste de Fischer (LSD) com $p \leq 0,1$.

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado em cobertura no estágio V4 do milho.

6.3.3 Produtividade de grãos, disponibilidade do N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) e viabilidade econômica

A produtividade média de grãos para milho de primeira safra no Brasil foi de 5,5 e 5,6 Mg ha^{-1} , respectivamente, nas safras 2016/17 e 2017/18 (CONAB, 2017, 2018). Já a média da produtividade de grãos observada nesse estudo foi de 9,4 e 12,5 Mg ha^{-1} , respectivamente, nas safras 2016/17 e 2017/18, sendo superior a média nacional. A diferença média entre as safras ($\cong 3 \text{ Mg ha}^{-1}$ maior na segunda safra), provavelmente, foi devido à maior disponibilidade de água observada durante a estação de crescimento (649 mm) (Figura 1). Os resultados de produtividade de grãos submetidos à análise de variância mostrou que não houve interação significativa entre os fertilizantes nitrogenados, as doses de N e o tratamento controle em ambas as safras avaliadas. Os valores da probabilidade (p) do teste de F, também, mostraram que não houve significância estatística quando avaliados apenas os fertilizantes nitrogenados ou as doses de N e o tratamento controle de ambas as safras (Tabela 6).

A variabilidade na produção agrícola entre locais e anos é comum na agricultura (GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018) e a influência ambiental no rendimento das culturas depende, principalmente, das propriedades do solo e do comportamento climático em um ano específico (HATFIELD; WALTHALL, 2015; EDREIRA et al., 2017). Assim, a baixa produtividade de grãos na safra 2016/17 pode ser justificada pela premissa de Sakschewski et al. (2014) de que a produtividade do solo pode ser um fator limitante, uma vez que, a melhoria das ocorrências de estresse hídrico observados no período de crescimento poderiam ser parcialmente alcançados pela modificação da disponibilidade de água no solo. O clima pode variar muito de ano para ano, causando diferenças consideravelmente grandes no potencial de rendimento das culturas (CASSMAN; DOBERMANN; WALTERS, 2002), sendo que o estresse hídrico pode afetar diretamente a qualidade dos grãos e é uma preocupação para se alcançar a segurança alimentar (HATFIELD; WALTHALL, 2015).

Passioura (2006) sugeriu que o aumento no rendimento das culturas em condições limitadas de disponibilidade de água poderia ser alcançado por meio do melhoramento das culturas pela captação de mais água para a transpiração, trocando a água por CO_2 de forma mais eficaz e convertendo mais biomassa em produtos de colheita. Dessa forma, práticas de manejo que reduzam perdas por evaporação de água no solo e melhor desenvolvam o cultivo das mesmas com o fornecimento de água seriam benéficas para garantir a disponibilidade adequada de água durante toda a estação de crescimento. Melhorias na eficiência de uso da água pelo manejo do solo foram resumidas por Hatfield; Sauer; Prueger (2001), sugerindo que

Tabela 6 – Resultados da análise de variância da produtividade de grãos (Mg ha^{-1}) avaliada na colheita mecanizada do milho pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP) na safras agrícolas 2016/17 e 2017/18.

Tratamentos	Produtividade de grãos (Mg ha^{-1})	
	Safra 2016/17	Safra 2017/18
<u>Fertilizante nitrogenado</u>		
Controle	10,31	12,34
U+UREP	8,84	11,73
U	9,67	12,88
NA	9,01	13,05
<u>Doses de nitrogênio (kg de N ha^{-1})</u>		
0	10,31	12,34
75	9,80	11,94
150	9,52	13,06
225	8,86	12,97
300	8,52	12,25
Fertilizante Nitrogenado (F)	0,180	0,376
Doses de nitrogênio (D)	0,165	0,720
F x D	1,000	0,840
C.V. (%)	20	18

o manejo do solo desempenha um papel fundamental na capacidade de fornecer a disponibilidade de água adequada para alcançar a produtividade máxima. Os resultados de Egli e Hatfield (2014) demonstraram que os rendimentos médios de milho e soja no condado de Kentucky, Iowa e Nebraska, Estados Unidos da América, estavam diretamente relacionados com os índices de produtividade, sugerindo atenção aos aspectos relacionados à qualidade do solo com base na disponibilidade de água, incluindo a capacidade de retenção de água e profundidade de raízes que podem melhorar a estrutura do solo para aliviar condições anóxicas, facilitando a troca de oxigênio em condições de solo com água em excesso.

De acordo com Ciampitti; Vyn (2013) e DeBruin et al. (2017) o milho responde positivamente à adição de N. No entanto, também existem alguns estudos realizados em regiões tropicais mostrando que, às vezes, não se observam respostas à aplicação de N (GOES et al., 2012; GONZÁLEZ-VILLALBA, 2014; SCHONINGER, 2014; GARCIA et al., 2018), dependendo principalmente das propriedades do solo e do comportamento climático. Os resultados de produtividade de grãos obtidos são atípicos para a cultura, levando em consideração as altas doses de N avaliadas. Os fertilizantes nitrogenados e o tratamento controle resultaram em produtividades semelhantes em relação às doses de N aplicadas, possivelmente, pela disponibilização do N mineral no solo que pode ter sido semelhante entre

a maioria das parcelas experimentais. Por exemplo, nos tratamentos com o *blend* de U+UREP nos estádios V4 e V8 é possível observar uma grande concentração do N mineral no solo, inclusive no tratamento controle (Figura 4).

Cabe ressaltar que as variações nas concentrações de $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ no solo estão relacionadas ao aporte de N pelas plantas de cobertura, remoção de N pelas culturas, variações sazonais de temperatura e pluviosidade, além das doses de N aplicadas nos meios de

Figura 4 – Concentrações médias de N mineral no solo ($\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$) em diferentes profundidades e em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície de doses do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (U+UREP), na safra agrícola 2016/17.

cultivo (SAINJU et al., 2007). De modo geral, a dose de 300 kg de N ha⁻¹ proporcionou as maiores concentrações de N mineral no solo em quase todas as profundidades avaliadas durante todo o ciclo de cultivo do milho (Tabela 7), embora tenha sido observado maiores valores na disponibilidade de N mineral nos tratamentos utilizando *blend* de U+UREP não foi possível observar diferenças no acúmulo de N pelas plantas ao fim do ciclo da cultura (Tabela 5) e nem na produtividade de grãos (Tabela 6).

Vários estudos demonstraram e sugeriram que uma certa produtividade de grãos poderia ser alcançada utilizando fertilizantes de eficiência aumentada com doses de N abaixo daquelas necessárias com a aplicação da U. Por exemplo, Halvorson; Bartolo (2014) não encontraram diferenças na produtividade de grãos de milho com a aplicação de U e Super U[®]

Tabela 7 – Concentrações médias de N mineral no solo (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) em diferentes profundidades e em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície de doses do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), na safra agrícola 2016/17.

Doses de nitrogênio	Estádio fenológico					
	V4	V8	V12	R1	R3	R6
	----- N-NO ₃ ⁻ + N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹) -----					
	<u>0-0,2 m</u>					
Controle [†]	17,0 c	23,3 b	7,5 c	1,4 b	4,5 b	3,3 b
75 kg de N ha ⁻¹	31,6 c	20,9 b	8,3 c	1,1 b	3,2 c	3,3 b
150 kg de N ha ⁻¹	110,0 b	23,3 b	7,7 c	1,1 b	3,2 c	4,2 a
225 kg de N ha ⁻¹	105,0 b	19,4 b	29,6 a	1,5 b	3,0 c	2,6 c
300 kg de N ha ⁻¹	135,0 a	41,7 a	26,6 b	3,0 a	5,3 a	2,3 c
p > F	<0,001	0,001	<0,001	0,002	<0,001	0,001
	<u>0,2-0,4 m</u>					
Controle	32,4 c	26,1 a	1,7 c	0,7 c	3,7 b	1,9
75 kg de N ha ⁻¹	27,4 c	25,6 a	2,2 c	1,6 c	4,0 b	2,2
150 kg de N ha ⁻¹	62,5 b	20,7 b	2,1 c	3,0 b	3,4 b	2,6
225 kg de N ha ⁻¹	68,1 b	21,4 b	5,7 b	4,0 b	4,0 b	3,0
300 kg de N ha ⁻¹	91,1 a	21,5 b	20,7 a	20,5 a	20,4 a	2,4
p > F	<0,001	0,005	<0,001	<0,001	<0,001	0,242
	<u>0,4-0,6 m</u>					
Controle	21,0 c	22,0 a	2,9 d	2,2 c	5,1 c	5,2 c
75 kg de N ha ⁻¹	22,1 c	9,1 bc	4,1 bc	3,0 c	4,2 c	5,2 c
150 kg de N ha ⁻¹	30,4 c	8,0 c	3,3 cd	3,1 c	3,0 d	5,5 bc
225 kg de N ha ⁻¹	54,2 b	6,7 c	4,9 b	8,6 b	7,0 b	6,0 ab
300 kg de N ha ⁻¹	72,8 a	13,8 b	11,2 a	11,8 a	11,6 a	6,1 a
p > F	0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,041

[†] Controle indica ausência de aplicação de fertilizante nitrogenado.

(ureia convencional tratada com NBPT) em um estudo avaliando fontes e doses de N em três anos de cultivo. Por outro lado, os autores observaram maior produtividade de grãos ($\cong 1 \text{ Mg ha}^{-1}$ maior) com a aplicação de ureia revestida com polímero, quando comparada a U e ao Super U[®], sugerindo que a dose de N pode ser reduzida quando utilizada ureia revestida com polímero em relação à U e/ou ureia estabilizada. Em contrapartida Cancellier et al. (2016) estudaram a aplicação de U, uréia revestida com enxofre e polímero orgânico, ureia revestida com boro e cobre e ureia convencional tratada com NBPT, aplicados a 0,1 m das plantas de milho no estágio V5 em um sistema de cultivo sob plantio direto de longo prazo (15 anos) em Lavras, Estado de Minas Gerais, verificando que a ureia estabilizada e de liberação controlada não promoveram aumentos no rendimento do milho e não melhoraram a eficiência agrônômica da adubação nitrogenada. De modo semelhante a esse estudo, trabalhos em regiões tropicais realizados por Civardi et al. (2011), Queiroz et al. (2011), Almeida et al. (2014), Maestrello et al. (2014), Martins; Cazetta; Fukuda (2014) e Valderrama et al. (2014) demonstraram que a ureia revestida por diversos tipos de polímeros não apresentou a eficiência esperada, tendo a produtividade de grãos semelhante à obtida com a U ou até se igualando aos tratamentos controle. Os estudos foram desenvolvidos em condições climáticas, tipos de solos e sistemas de cultivo distintos, dificultando a previsão de resposta da cultura do milho à aplicação de N. Além disso, os resultados obtidos com a utilização de ureia revestida com polímeros podem variar conforme a época e o modo de aplicação do fertilizante.

Vários estudos apontam vantagens nos rendimentos das culturas de cereais e na EUN com a aplicação de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada em comparação com os fertilizantes nitrogenados convencionais (NASH; NELSON, MOTOVALLI, 2013; SHAO; NING; ZHENG, 2013; ZHAO et al., 2013; HALVORSON; BARTOLO, 2014), existindo estudos mostrando que o uso de ureia revestida com polímeros e *blends* de ureia convencional e ureia revestida com polímeros podem proporcionar maiores rendimentos de grãos e aumentar os lucros (ZHENG et al., 2016; GUO et al., 2017). No entanto, ainda são escassos os estudos que avaliam a mistura física de dois fertilizantes de eficiência aumentada (ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros) no rendimento das culturas em condições brasileiras. Como comentado anteriormente por Campos et al. (2018), a ureia convencional tratada com NBPT é altamente solúvel e menos suscetível às perdas de N por volatilização de NH_3 , garantindo disponibilidade de N para atender a demanda inicial da cultura; e a ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros pode atender a demanda da cultura a partir da solubilidade gradual do nutriente em fases posteriores de crescimento (GUELF, 2017). Além dessas características melhoradas, o

fertilizante nitrogenado utilizado nesse estudo foi aplicado a lanço sobre a superfície do solo, sendo essa, uma prática de manejo comumente utilizada pelos produtores brasileiros por apresentar facilidade na aplicação e maior rendimento operacional (KANEKO et al., 2015), entretanto, pode diminuir a EUN e o rendimento da cultura. Portanto, as fontes de nutrientes utilizadas nesse estudo e o modo de aplicação dos fertilizantes nitrogenados podem vir a contribuir para um melhor rendimento em estações de crescimento, onde não há ocorrência de déficit hídrico.

Embora os resultados de produtividade de grãos em função dos fertilizantes nitrogenados e as doses de N tenham sido iguais nas duas estações de crescimento (Tabela 6), foi possível observar que na safra 2016/17 a média dos resultados da produtividade de grãos do tratamento controle foi superior que os demais tratamentos, resultando em acréscimos na produtividade de grãos negativo em todos os tratamentos fertilizados (Tabela 8). Na safra 2017/18, cerca de 1,7% separa a média dos resultados da produtividade de grãos dos tratamentos fertilizados do tratamento controle, sendo muito estreita a faixa observada na diferença dos rendimentos da cultura, dessa forma, os acréscimos na produtividade de grãos foi muito pequeno e em algumas situações negativo (NA – 300 kg de N ha⁻¹; U+UREP – 75 kg de N ha⁻¹; U+UREP – 150 kg de N ha⁻¹ e U+UREP – 300 kg de N ha⁻¹), devido a média da produtividade de grãos do tratamento controle ser maior que de alguns tratamentos fertilizados. As variações no valor de produção referentes à adubação nitrogenada foram proporcionais ao acréscimo na produtividade de grãos em função das doses de N em ambas as safras.

Tabela 8 – Produtividade de grãos de milho, acréscimo na produtividade e no valor de produção, custo da adubação nitrogenada e margem de lucratividade pela aplicação em superfície de ureia convencional (U), nitrato de amônio (NA) e *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP) nas safras agrícolas 2016/17 e 2017/18.

Tratamentos		Acréscimo								
Fontes de N	Doses de N kg ha ⁻¹	Produtividade de grãos		Produtividade		Valor de Produção		Custo da adubação	Margem de lucratividade	
		— Mg ha ⁻¹ —		— Mg ha ⁻¹ —		— US\$ ha ⁻¹ —		US\$ ha ⁻¹	— US\$ ha ⁻¹ —	
		2016/17	2017/18	2016/17	2017/18	2016/17	2017/18		2016/17	2017/18
Controle	0	10,31	12,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
U+UREP	75	9,79	10,10	-0,52	-2,24	-77,91	-335,63	139,50	-217,41	-475,13
U+UREP	150	8,75	12,31	-1,56	-0,03	-233,74	-4,49	258,00	-491,74	-262,50
U+UREP	225	8,80	12,52	-1,51	0,18	-226,25	26,97	376,50	-602,75	-349,53
U+UREP	300	8,04	12,00	-2,27	-0,34	-340,12	-50,94	495,00	-835,12	-545,94
Média (U+UREP)		8,85	11,73	-1,47	-0,61	-219,51	-91,02	317,25	-536,76	-408,27
U	75	10,09	12,39	-0,22	0,05	-32,96	7,49	69,00	-101,96	-61,51
U	150	10,03	13,30	-0,28	0,96	-41,95	143,84	117,00	-158,95	26,84
U	225	9,51	13,16	-0,80	0,82	-119,87	122,86	165,00	-284,87	-42,14
U	300	8,74	12,67	-1,57	0,33	-235,24	49,45	213,00	-448,24	-163,56
Média (U)		9,59	12,88	-0,72	0,54	-107,51	80,91	141,00	-248,51	-60,09
NA	75	9,53	13,33	-0,78	0,99	-116,87	148,34	72,00	-188,87	76,34
NA	150	9,45	13,57	-0,86	1,23	-128,86	184,30	123,00	-251,86	61,30
NA	225	8,28	13,22	-2,03	0,88	-304,16	131,85	174,00	-478,16	-42,15
NA	300	8,79	12,09	-1,52	-0,25	-227,75	-37,46	225,00	-452,75	-262,46
Média (NA)		9,01	13,05	-1,30	0,71	-194,41	106,76	148,50	-342,91	-41,74
Média Total		9,44	12,50	-0,87	0,16	-130,36	24,16	151,69	-282,04	-127,53

A variação no custo da adubação é impulsionada pelo custo dos fertilizantes nitrogenados e são bastante expressivos os custos da adubação quando avaliada uma mesma dose de N em relação aos fertilizantes nitrogenados, nos quais podem variar de 18 a 23% da U em relação ao NA, de 48 a 55% do NA em relação ao *blend* de U+UREP e de 51 a 57% da U em relação ao *blend* de U+UREP. Os resultados da margem de lucratividade foram negativos para todos os tratamentos fertilizados, possivelmente, pelo acréscimo na produtividade de grãos negativo que foi proporcionado pela produtividade de grãos do tratamento controle e pela falta de diferença estatística nos resultados de produtividade de grãos que, possivelmente, foi influenciado pelas condições climáticas. O acréscimo na produtividade de grãos faz parte da estrutura dos cálculos dos valores de produção e da margem de lucratividade, dessa forma, o acréscimo no rendimento tem influência direta nos resultados dessas variáveis. Na safra seguinte a aplicação de 75 kg de N ha⁻¹ com NA resultou na maior margem de lucratividade, seguido da aplicação de 150 kg de N ha⁻¹ com NA e 150 kg de N ha⁻¹ na forma de U.

A partir do estudo da viabilidade econômica que foi realizada para os fertilizantes nitrogenados e doses de N aplicados em superfície e sobre palha de *Brachiaria ruziziensis* e de estudos avaliando a viabilidade econômica e a rentabilidade do manejo da adubação nitrogenada em milho (PAVINATO et al., 2008; SOUZA et al., 2012; ZUCARELI et al., 2012; SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015), ficou evidente que a melhor produtividade de grãos é aquela que se baseia no menor custo de produção. Dessa forma, os produtores devem estar atentos à escolha dos fertilizantes nitrogenados a serem utilizados, para otimizar e aumentar a eficiência de uso do N e, conseqüentemente, a utilização de menores doses de N para obtenção de altas produtividades com maior retorno econômico (SOUZA; BUZETTI; MOREIRA, 2015).

6.3.4 Contribuição das fontes de nitrogênio no *blend* de U+UREP para o acúmulo de N na planta e eficiência do N-fertilizante

A porcentagem do N acumulado na planta derivado da ^{15}N -ureia tratada com NBPT (N-UNBPT) e N-ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (N-UREP) são apresentados na Tabela 9. O N derivado do solo (N-Solo) no estágio V4 foi maior do que o N-UREP e da N-UNBPT, respectivamente (Figura 5). A reduzida contribuição do N-UNBPT para o acúmulo de N total na planta nesse estágio fenológico é atípico, uma vez que, a ureia convencional tratada com NBPT é considerada uma fonte de nutriente de pronta liberação para ser utilizada pelas plantas. O N-UREP desempenhou um papel maior no fornecimento do N ao milho entre os estágios V8 e V12, provavelmente devido à natureza de liberação controlada desse fertilizante (TRENKEL, 2010). Segundo Magalhães; Durães (2006) no estágio V8 inicia-se a queda das primeiras folhas e o número de fileiras de grãos é definido, enquanto que no estágio V12 são definidos o número de óvulos (grãos em potencial) e o tamanho da espiga, podendo-se considerar que nessas fases inicia-se o período mais crítico para a produção o qual se estende até a polinização, portanto, o fornecimento de N adequado às plantas nesses estágios se faz necessário. Entre os estágios V12 e R1 foi possível observar uma diminuição do N-UREP (de 63,9 em V12 para 49,6 kg de N ha^{-1} em R1, média entre as doses de N avaliadas), o que poderia ser justificado pela diminuição na produção de BS e acúmulo de N entre esses estágios (Tabela 4 e 5), porém há aumento do acúmulo de N na planta derivado do N-UNBPT, sendo assim, não está claro os processos que podem ocorrer para que isso aconteça. Entretanto, González-Villalba (2018) observou uma diminuição do N-UNBPT, ao invés do N-UREP, entre os estágios V12 e R2 (de 13,6 em V12 para 12,4 kg N

ha⁻¹ em R2). Segundo o autor, uma possível explicação estaria associada à redistribuição do N que foi absorvido e assimilado pelas plantas nos estádios iniciais, para posteriormente ser redistribuído para o crescimento e desenvolvimento das raízes. Outra suposição plausível seria que durante o processo de redistribuição do N da parte aérea para os grãos em desenvolvimento, parte do N aplicado acabaria sendo perdido por volatilização de NH₃ através das folhas e caules, sendo que as condições climáticas (como a ocorrência de pluviosidade) poderia influenciar nessas perdas (SCHONINGER et al. 2018). De acordo com os autores a porcentagem de NH₃ volatilizado variou de 23 a 68% e a porcentagem de N volatilizado recuperado pela planta foram 3,4, 5,5, 6,2, 9,0 e 14,8% nos estádios V4, V6, V8, V10 e V12 em duas estações de crescimento.

Há vários estudos com ¹⁵N-fertilizantes que frequentemente mostram a importância do N-Solo no acúmulo de N pelas plantas (JENKINSON; FOX; RAYNER, 1985). Stevens et al. (2005b) estudando a eficiência da absorção do N e o destino do ¹⁵N em plantas de milho adubadas com nitrato de amônio (¹⁵NH₄¹⁵NO₃) em Illinois, Estados Unidos da América, verificaram que absorção do N-Solo sempre foi mais expressiva, representando 53 a 84% do acúmulo de N total da planta. Gava et al. (2010) estudando a produção de fitomassa e o acúmulo de N em milho cultivado nas doses de 0, 50, 100, 150 e 200 kg de N ha⁻¹ na forma de U no Brasil, encontraram que o N-Solo foi responsável por 78% do acúmulo de N total nas plantas de milho, enquanto apenas 22% derivaram do N-fertilizante. González-Villalba (2018) avaliou a possibilidade de utilizar o *blend* de U+UREP para melhorar a eficiência de uso do N e o rendimento de grãos de milho em Iracemápolis, Estado de São Paulo, verificando que a eficiência de uso do N-Solo (em relação a dose de N aplicada) contribuiu com 54 a 77% do acúmulo de N total na planta. Os resultados obtidos mostram que a eficiência de uso do N-Solo (em relação ao acumulado pela planta) variou de 43 a 63%, se assemelhando aos resultados dos autores anteriormente descritos, corroborando com a ideia de que o N-Solo proveniente dos processos de imobilização-mineralização de N da matéria orgânica do solo foi a principal fonte de N para o acúmulo do nutriente nas plantas de milho. De acordo com Stevens et al. (2005a; b) o N-Solo pode permanecer como a principal fonte de N às plantas, independentemente do solo e das condições climáticas, com valores semelhantes entre regiões tropicais e temperadas.

Tabela 9 – Porcentagem do nitrogênio (N) acumulado na planta derivado do solo, N-ureia tratada com NBPT (N-UNBPT) e N-ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (N-UREP) alocada nas folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), na proporção 30:70, na safra agrícola 2016/17.

Doses de nitrogênio	Estádio fenológico																	
	— V4 —		— V8 —		— V12 —		— R1 —			— R3 —			— R6 —					
	Fração da planta																	
	F	F	C	F	C	F	C	S	G	F	C	S	G	F	C	S	G	Total
kg ha ⁻¹	----- % -----																	
	N na planta derivado do solo																	
75	48	61	35	49 a	59	12	76 a	59	50	56	57 a	52 b	45 b	77 a	53	83 a	62	275 a
150	58	47	31	51 a	62	16	51 b	60	64	59	48 ab	73 a	67 a	79 a	54	71 b	64	268 a
225	45	40	29	38 b	44	19	44 bc	59	54	67	39 bc	70 a	49 b	73 ab	41	73 ab	42	229 b
300	50	44	28	33 c	47	21	39 c	57	55	56	37 c	68 a	47 b	68 c	49	51 c	46	214 b
p > F	0,607	0,112	0,410	<0,001	0,146	0,514	<0,001	0,983	0,808	0,579	0,006	0,002	0,009	0,092	0,327	0,001	0,170	0,018
	N na planta derivado da ureia revestida com NBPT (N-UNBPT)																	
75	9 c	7 c	10 b	10 c	11 c	9 c	9 c	8 c	8 b	8 c	8 c	7 b	7 c	8 b	3 c	7 b	7 b	25 b
150	3 d	12 b	12b	13 b	12 c	14 b	13 b	13 b	13 b	15 b	14 b	15 a	13 b	18 a	7 b	17 a	16 a	58 a
225	16 b	16 b	14 b	20 a	16 b	17 ab	16 ab	16 b	17 b	17 ab	17 ab	17 a	16 ab	16 a	10	16 a	15 a	57 a
300	23 a	26 a	20 a	22 a	21 a	21 a	20 a	20 a	28 a	19 a	18 a	18 a	18 a	18 a	10	17 a	16 a	61 a
p > F	0,003	0,002	0,003	<0,001	0,002	<0,001	0,001	<0,001	0,015	0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,001	<0,001	<0,001	0,083
	N na planta derivado da ureia revestida com enxofre e polímeros (N-UREP)																	
75	43	32	55	41 ab	32 b	79 a	15 b	33	42	36	35	41 a	48 a	15	44	10 b	31 ab	100
150	39	41	57	36 b	26 b	70 ab	36 a	27	23	26	38	12 b	20 c	3	39	12 b	20 c	74
225	39	44	57	42 a	40 a	64 bc	40 a	25	29	16	44	13 b	35 b	11	49	11 b	43 a	114
300	27	30	52	45 a	32 b	58 c	41 a	23	17	25	45	14 b	35 b	14	41	32 a	38 ab	125
p > F	0,306	0,101	0,735	0,029	0,049	0,013	0,002	0,569	0,149	0,291	0,301	<0,001	0,002	0,106	0,361	0,017	0,277	0,110

Figura 5 – Acumulo de nitrogênio total na planta (kg de N ha⁻¹ e %) derivado do solo (N-Solo), ¹⁵N-ureia tratada com NBPT (N-UNBPT) e N-ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (N-UREP) em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície do *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (U+UREP), na proporção 30:70, na safra agrícola 2016/17. Média do tratamento controle e as doses de N.

Os valores da porcentagem do N-fertilizante em relação ao acumulado pela planta derivado da ¹⁵N-ureia tratada com NBPT (% UNBPT_{planta}) e N-ureia revestida com enxofre elementar (S⁰) e polímeros (% UREP_{planta}) são apresentados na Tabela 10. As doses de N afetaram os valores na % UNBPT_{planta} em todos os estádios fenológicos, enquanto que os valores na % UREP_{planta} apresentou diferenças significativas apenas no estágio V12. Em geral, os menores valores da eficiência na % UNBPT_{planta} foram observados nas menores doses de N, enquanto que não houve um padrão em relação ao aumento das doses de N nos valores da % UREP_{planta}. Os dados obtidos vão em oposição aos resultados obtidos por González-Villalba (2018) que observou aumento nos valores da porcentagem de N-fertilizantes nitrogenados (em relação à dose de N aplicada) nas menores doses de N avaliadas. Os valores de % UNBPT_{planta} se mantiveram constantes durante todo o ciclo da cultura, enquanto que a % UREP_{planta} foi maior nos estádios V12 e R1. Na maturidade fisiológica (estádio R6), a eficiência no uso foi em média de 14% para % NBPTU_{planta} e 23% para % UREP_{planta}, mostrando melhor desempenho da fonte de nutrientes de liberação controlada, em concordância com outras pesquisas (ZHAO et al., 2013; GENG et al., 2016; ZHENG et al., 2016; GUO et al., 2017).

Tabela 10 – Porcentagem do N-fertilizante em relação ao acumulado pela planta em sucessivos estádios fenológicos do milho pela aplicação em superfície do *blend* de ^{15}N -ureia tratada com NBPT (% UNBPT_{planta}) e N-ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros (% UREP_{planta}), na proporção 30:70, na safra agrícola 2016/17.

Doses de nitrogênio	Ureia revestida com NBPT (UNBPT)						Ureia revestida com enxofre e polímeros (UREP)					
	V4	V8	V12	R1	R3	R6	V4	V8	V12	R1	R3	R6
kg ha ⁻¹	----- % -----						-----					
75	9 c	11 c	10 d	9 c	8 c	7 b	43	37	35 bc	19	28	31
150	3 d	13 ab	13 c	13 b	14 b	17 a	39	38	32 b	22	25	14
225	16 b	15 b	19 b	17 b	17 ab	16 a	39	45	42 a	26	20	29
300	23 a	22 a	22 a	27 a	18 a	17 a	27	47	41 ab	21	23	29
<i>p</i> > F	0,004	0,002	<0,001	<0,001	0,001	<0,001	0,306	0,237	0,071	0,793	0,906	0,438
C. V. (%)	28	22	16	20	21	15	32	20	15	27	28	38

A porcentagem do N em experimentos de campo é geralmente calculado pelo método da diferença ou pelo método direto, entretanto, nesse estudo utilizou-se de ambos os métodos para permitir discriminar o acúmulo de N na planta derivado do *blend* de U+UREP (^{15}N -ureia tratada com NBPT e N-ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros). A metodologia isotópica (método direto) é uma ferramenta direta da estimativa na eficiência de recuperação dos fertilizantes nitrogenados e permite avaliar a eficiência de uso do N que foi aplicado via fertilizante, permitindo distinguir a origem do nutriente na planta, além da partição deste entre as frações da planta depois de absorvido (ANDREUCCI, 2007). O método da diferença é o método mais comumente utilizado para o cálculo da eficiência no uso de fertilizantes nitrogenados, baseando-se nas diferenças na absorção de N entre as parcelas fertilizadas e não fertilizadas (RAO et al., 1991). O método direto normalmente resulta em valores mais baixos em comparação ao método da diferença, embora ambos estejam fortemente relacionados. Ladha et al. (2005) relataram uma eficiência na recuperação do N de 55% pelo método da diferença, comparado a 44% do método direto (^{15}N). Rao et al. (1991) mostraram uma diferença de aproximadamente 20% entre as estimativas da eficiência na recuperação do N pelos dois métodos.

Hauck; Bremmer (1976) afirmam que pode ocorrer superestimação na recuperação do N-fertilizante pelo método da diferença devido ao “priming effect” ou da “interação do N adicionado”. Segundo Jenkinson; Fox; Rainer (1985) esse efeito é definido como uma aceleração da mineralização da matéria orgânica do solo devido a um estímulo externo, ou seja, o fornecimento de uma energia facilmente decomponível à biomassa microbiana do solo, resultando em maior mineralização e disponibilidade do N do solo para as plantas. Por outro lado, o método isotópico pode ser subestimado devido ao “pool substitution” do ^{15}N por ^{14}N ,

podendo resultar em uma recuperação menor do que a real caso essa substituição não seja considerada. De acordo com Jenkinson; Fox; Rainer (1985) o ^{15}N pode ser substituído por ^{14}N do solo, que de outra maneira poderia ter sido imobilizado e/ou desnitrificado pela biomassa microbiana do solo, diminuindo a disponibilidade de ^{15}N para as plantas, ocasionando em menores valores na eficiência da recuperação. Rao et al. (1991) menciona que os principais fatores que devem influenciar a estimativa da eficiência na recuperação são o carbono orgânico do solo, a relação C:N e a biomassa microbiana que irão afetar a “pool substitution” pelos processos de imobilização, mineralização e desnitrificação.

Como já comentado por González-Villalba (2018) é necessário discutir mais a abordagem utilizada nesse estudo pois é de grande importância para a compreensão adequada dos resultados obtidos, visto que, o experimento de campo ideal utilizaria fertilizantes nitrogenados marcados com ^{15}N em ambas as fontes de nutriente presente no *blend* de U+UREP, sendo necessário a instalação de duas micro-parcelas para obter valores mais precisos na recuperação do N-fertilizante da N-ureia tratada com NBPT e N-ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros. Dessa forma, seriam obtidos valores de recuperação de N de cada uma das fontes N que foram utilizadas no *blend*.

6.4 CONCLUSÕES

1. A adubação com $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ promoveu as maiores perdas por volatilização de NH_3 , sendo que o *blend* de U+UREP foi capaz de reduzir as perdas cumulativas de NH_3 em relação à U.
2. As condições climáticas na safra 2016/17 influenciaram a produção de BS e o acúmulo de N, sendo que na colheita (estádio R6) cerca de 33% da BS consistiu na matéria seca de grãos e 47% do acúmulo de N ficou alocado nos grãos.
3. A aplicação dos fertilizantes nitrogenados e doses de N não promoveram diferenças na produtividade de grãos em duas safras agrícolas.
5. O N proveniente do solo foi a principal fonte de N para as plantas durante o ciclo de cultivo, sendo que a % $\text{NBPTU}_{\text{planta}}$ foi de 14% e a % $\text{UREP}_{\text{planta}}$ de 23%.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. E. M. **Fertilização nitrogenada no consórcio milho–braquiária em solos de clima tropical úmido no sistema de integração lavoura pecuária**. 2014. 149p. Tese (Doutorado em Ciências - Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, A. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; HERLING, V. L.; TRIVELIN, P. C. O.; LUZ, P. H. C.; ALVES, T. C.; ROCHETTI, R. C.; BARIONI JUNIOR, W. New methods to quantify NH₃ volatilization from fertilized surface soil with urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 133-140, 2011.

ANDREUCCI, M. A. Perdas de nitrogenadas e recuperação aparente do nitrogênio em fontes de adubação do campim elefante. 2007. 102p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

ATTIA, A.; SHAPIRO, C.; KRANZ, W.; MAMO, M.; MAINZ, M. Improved yield and nitrogen use efficiency of corn following soybean in irrigated sandy loams. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 1693-1703, 2015.

BARRIE, A.; PROSSER, S. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.; YAMASAKI, S. **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. 1-46.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 905-915, 2000.

BENDER, R. R.; HAEGELE, J. W.; RUFFO, M. L.; BELOW, F. E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 161-170, 2013.

BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: EDUFRGS, 1992. p.11-23.

BRYSON, G. M.; MILLS, H. A. **Plant analysis handbook IV: A practical sampling, preparation, analysis and interpretation guide**. 4 ed. Athens: Micro Macro Publishing, 2015.

CAMPOS, O. R.; MATTIELLO, E. M.; CANTARUTTI, R. B.; VERGÜTZ, L. Nitrogen release from urea with different coatings. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 2, p. 775-780, 2018.

CANCELLIER, E. L.; SILVA, D. R. G.; FAQUIN, V.; GONÇALVES, B. A.; CANCELLIER, L. L.; SPEHAR, C. R. Ammonia volatilization from enhanced-efficiency urea on no-till maize in brazilian cerrado with improved soil fertility. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 2, p. 133-144, 2016.

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

CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D. T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **Ambio**, v. 31, n. 2, p. 132-140, 2002.

CHALK, P. M.; CRASWELL, E. T.; POLIDORO, J. C.; CHEN, D. Fate and efficiency of ¹⁵N-labelled slow- and controlled-release fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 2, p. 167-178, 2015.

CHENG, N. C. **Eficiência de uso da ¹⁵N-ureia tratada com ácido bórico e sulfato de cobre pelo milho**. 2018. 113 p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

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

CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Research**, v. 121, n. 1, p. 2-18, 2011.

CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGANIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.

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

DEKALB. **Híbridos de milho: DKB290**. Disponível em: <https://www.dekalb.com.br/pt-br/nossos-produtos/hibridos-milho/verao/dkb-290.html>. Acesso em: 22 nov. 2018.

DOUGLAS, L. A.; RIAZI, A.; SMITH, C. J. A semi-micro method for determining total nitrogen in soils and plant material containing nitrate and nitrite. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 431-433, 1980.

EDREIRA, J. I. R.; MOURTZINIS, S.; CONLEY, S. P.; ROTH, A. C.; CIAMPITTI, I. A.; LICHT, M. A.; KANDEL, H.; KYVERYGA, P. M.; LINDSEY, L. E.; MUELLER, D. S.; NAEVE, S. L.; NAFFZIGER, E.; SPECHT, J. E.; STANLEY, J.; STATON, M. J.; GRASSINI, P. Assessing causes of yield gaps in agricultural areas with diversity in climate and soils. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 247, p. 170-180, 2017.

EGLI, D. B.; HATFIELD, J. L. Yield gaps and yield relationships in central U.S. soybean production systems. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 560-566, 2014.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: Graphel, 2008. 230p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Ecofisiologia e fenologia**. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Produção de milho. Guaíba: Agropecuária, 2000. p. 21-54.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Distribuição do nitrogênio do sulfato de amônio (^{15}N) no sistema solo-planta, em uma sucessão de culturas, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 885-894, 2012.

FRANÇA, S.; MIELNICZUK, J.; ROSA, L. M. G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. Nitrogênio disponível ao milho: crescimento, absorção e rendimento de grãos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1143-1151, 2011.

FRENEY, J. R.; DENMEAD, O. T.; WOOD, A. W.; SAFFIGNA, P. G. Ammonia loss following urea addition to sugar cane trash blankets. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology**, v. 16, p. 114-121, 1994.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 370, p. 789-799, 2002.

GAVA, G. J. C.; OLIVEIRA, M. W.; SILVA, M. A.; JERÔNIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; TRIVELIN, P. C. O. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de 15 N-uréia. **Semina**, v. 31, n. 4, p. 851-862, 2010.

GENG, J.; CHEN, J.; SUN, Y.; ZHENG, W.; TIAN, X.; YANG, Y.; LI, C.; ZHANG, M. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency and yield of wheat and corn. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1666-1673, 2016.

GINÉ, M. F.; BERGAMIN FILHO, H. ZAGATTO, E. A. G.; REIS, B. F. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flows injection analysis. **Analytica Chimica Acta**, v. 114, p. 191-197, 1980.

GLOBALFERT®. **Preços matérias-primas (CFR – Paranaguá)**. Disponível em: <<https://globalfert.com.br/PrecosMP>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

GOERTZ, H. M.; TIMMONS, R. J.; MCVEY, G. R. **Sulfur coated fertilizers and process for the preparation thereof**. US Pat.: EP 0574541 B1, 17 set. 1992.

GONZAGA, M. M.; TRIVELIN, P. C. O. **Eficiência de um coletor aberto em capturar o NH_3 volatilizado do solo**. In: 26º Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP (SIICUSP), Piracicaba, 2018. Anais. Piracicaba, ESALQ/USP, 2018.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GUELF, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15 \text{ Mg ha}^{-1}$) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

HALVORSON, A. D.; BARTOLO, M. E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 681-693, 2014.

HATFIELD, J. L.; SAUER, T. J.; PRUEGER, J. H. Managing soils for greater water use efficiency: A review. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 2, p. 271-280, 2001.

HATFIELD, J. L.; WALTHALL, C. L. Meeting global food needs: Realizing the potential via genetics $\times$ environment $\times$ management interactions. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 4, p. 1215-1226, 2015.

HAUCK, R. D.; BREMMER, J. M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 219-266, 1976.

IEA - Instituto de Economia Agrícola. **Preços médios recebidos pelos agricultores**. Disponível em: <<http://ciagri.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

IMEA - Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. **Relatórios de mercado: custo de produção do milho – safra 2016/17**. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/19012018194738.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

IMEA - Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Relatórios de mercado: custo de produção do milho – safra 2017/18**. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/16022018134848.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

JENKINSON, D. S.; FOX, R. H.; RAYNER, J. H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called ‘priming’ effect. **European Journal of Soil Science**, v. 36, n. 3, p. 425-444, 1985.

KANEKO, F. H.; ARF, O.; SABUNDJIAN, M. T.; FERREIRA, J. P.; GITTI, D. C.; LEAL, A. J. F.; NASCIMENTO, V. Fontes e modos de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em sistema plantio direto. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 9, n. 2, p. 191-196, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatology: a study of the climates of the earth**. Mexico City: Fondo de Cultura Economica, 1948. 233p.

LADHA, J. K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T. J.; SIX, J.; van KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, v. 87, p. 85-156, 2005.

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

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da ureia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 3, p. 345-352, 1990.

LASSALETTA, L.; BILLEN, G.; GRIZZETTI, B.; ANGLADE, J.; GARNIER, J. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 10, p. 1-9, 2014.

MAESTRELO, P. R.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; RODRIGUES, M. A. C.; LINO, A. C. M.; ANDREOTTI, M. Aplicação de ureia revestida em cobertura no milho irrigado sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 2, p. 192-199, 2014.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. 10p. (circular técnica n. 76)

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; MEGDA, M. X. V.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 411-419, 2012.

MARTINS, I. S.; CAZETTA, J. O.; FUKUDA, A. J. F. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 3, p. 271-279, 2014.

MATZENAUER, R.; BEGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; RIBOLDI, J. Relações entre rendimento de milho e variáveis hídricas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 85-92, 1995.

NASH, P. R.; NELSON, K. A.; MOTOVALLI, P. P. Corn yield response to polymer and non-coated urea placement and timings. **International Journal of Plant Production**, v. 7, n. 3, p. 373-392, 2013.

NORONHA, J. F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e avaliação econômica**. São Paulo: Atlas, 1987. 269p.

OVERREIN, L. N.; MOE, P. G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 31, n. 1, p. 57-61, 1967.

PASSIOURA, J. Increasing crop productivity when water is scarce-from breeding to field management. **Agricultural Water Management**, v. 80, n. 1-3, p. 176-196, 2006.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A.; GIROTTI, E.; MOREIRA, I. C. L. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 358-364, 2008.

PIRES, M. V.; CUNHA, D. A.; CARLOS, S. M.; COSTA, M. H. Nitrogen-use efficiency, nitrous oxide emissions, and cereal production in Brazil: current trends and forecasts. **Plos One**, v. 10, n. 8, p. 1-19, 2015.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 4, p. 1015-1020, 2004.

PROCHNOW, L. I.; ABDALLA, S. R. S. A indústria de fertilizantes nitrogenados e o futuro. **Informações Agronômicas**, n. 120, p. 2-16, 2007.

QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, A. A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 10, n. 3, p. 257-266, 2011.

R CORE TEAM (2017). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Boletim técnico 100: recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto agronômico FUNDAG, 1996. 285p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420p.

RAO, A. C. S.; SMITH, J. L.; PAPENDICK, R. I.; PARR, J. F. Influence of added nitrogen interactions in estimating recovery efficiency of labeled nitrogen. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 6, p. 1616-1621, 1991.

RITCHIE, S.; HANWAY, J. J. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 1989. 21 p. (Special Report n. 48)

REIS, B. F.; VIEIRA, J. A.; KRUG, F. J.; GINÉ, M. F. Development of a flow injections system two analytical paths for ammonium determination in soil extracts by conductometry. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 8, n. 5, p. 523-528, 1997.

ROCHETTE, P.; MACDONALD, J. D.; ANGERS, D.; CHANTINI, M. H.; GASSER, M.; BERTRAND, N. Banding urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. **Journal Environmental Quality**, v. 38, n. 4, p. 1383-1390, 2009.

RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Volatilização de amônia após emprego de ureia em diferentes doses e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 37-43, 1986.

SAINJU, U. M.; SINGH, B. P.; WHITEHEAD, W. F.; WANG, S. Accumulation and crop uptake of soil mineral nitrogen as influenced by tillage, cover crops, and nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 682-691, 2007.

SAKSCHESKI, B.; VON BLOH, W.; HUBER, V.; MULLER, C.; BONDEAU, A. Feeding 10 billion people under climate change: How large is the production gap of current agricultural systems. **Ecological Modelling**, v. 288, p. 103-111, 2014.

SCHONINGER, E. L. **Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura**. 2014. 94p. Tese (Doutorado em Ciências – Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SCHONINGER, E. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; BENDASSOLLI, J. A.; TRIVELIN, P. C. O. Fertilizer Nitrogen and Corn Plants: Not all Volatilized Ammonia is Lost. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 3, p. 1111-1118, 2018.

SHAO, G.; LI, Z.; NING, T.; ZHENG, Y. Responses of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and grain yield of maize to controlled-release urea and irrigation after anthesis. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, p. 595-602, 2013.

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

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

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington: USDA; Natural Resources Conservation Service. 2014.

SOMMER, S. G.; SCHJOERRING, J. K.; DENMEAD, O. T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. **Advances in Agronomy**, v. 82, p. 557-622, 2004.

SOUFIZADEH, S.; MUNADO, E.; MCLEAN, G.; MASSIGNAM, A.; VAN OOSTEROM, E. J.; CHAPMAN, S. C.; MESSINA, C.; COOPER, M.; MARTELO, G. L. Modelling the nitrogen dynamics of maize crops – Enhancing the APSIM maize model. **European Journal of Agronomy**, p. 1-14, 2018.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; MOREIRA, A. Viabilidade econômica de fontes e doses de nitrogênio no cultivo do milho segunda safra em sistema de plantio direto. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 308-313, 2015.

SOUZA, J. A.; BUZETTI, S.; TARSITANO, M. A. A.; VALDERRAMA, M. Lucratividade do milho em razão das fontes, doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Revista Ceres**, v. 59, n. 3, p. 321-329, 2012.

STEVENS, W. B.; HOEFT, R. G.; MULVANEY, R. L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. Interactions with soil nitrogen. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 4, p. 1037-1045, 2005a.

STEVENS, W. B.; HOEFT, R. G.; MULVANEY, R. L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: II. Nitrogen uptake efficiency. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 4, p. 1046-1053, 2005b.

TA, C. T.; WEILAND, T. R. Nitrogen partitioning in maize during ear development. **Crop Science**, v. 32, n. 2, p. 443-451, 1992.

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

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, M. W.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; BENDASSOLLI, J. A. Nitrogen losses of applied urea in the soil-plant system during two sugar cane cycles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 193-201, 2002.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M. Adubação nitrogenada na cultura do milho com ureia revestida por diferentes fontes de polímeros. **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 2, p. 659-670, 2014.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 491-498, 2007.

WATSON, C. J.; MILLER, H.; POLAND, P.; KILPATRICK, D. J.; ALLEN, M. B. D.; GARRET, M. K.; CHRISTIANSON, C. B. Soil properties and the ability of the urease inhibitor N-(n-butyl)thiophosphoric triamid (nBTPT) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 26, n. 9, p. 1165-1171, 1994.

WEBER, C.; MCCANN, L. Adoption of Nitrogen-Efficient Technologies by U.S. Corn Farmers. **Journal of Environmental Quality**, v. 44, n. 2, p. 391-401, 2015.

ZAVASCHI, E.; FARIA, L. A.; VITTI, G. C.; NASCIMENTO, C. A.C.; MOURA, T. A.; VALE, D. W.; MENDES, F. L.; KAMOGAWA, M. Y. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1200-1206, 2014.

ZHANG, S.; SADRAS, V.; CHEN, X.; ZHANG, F. Water use efficiency of dryland maize in the Loess Plateau of China in response to crop management. **Field Crops Research**, v. 163, p. 55-63, 2014.

ZHAO, B.; DONG, S.; ZHANG, J.; LIU, P. Effects of controlled-release fertilizer on nitrogen use efficiency in summer maize. **Plos One**, v. 8, n. 8, p. 1-8, 2013.

ZHENG, W.; SUI, C.; LIU, Z.; GENG, J.; TIAN, X.; YANG, X.; LI, C.; ZHANG, M. Long-Term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1703-1716, 2016.

ZUCARELI, C.; PANOFF, B.; PORTUGAL, G.; FONSECA, I. C. B. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na qualidade fisiológica de sementes de milho doce. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 3, p. 480-487, 2012.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a população mundial ter atingido a marca de 7 bilhões de habitantes em 2011, ressurgiu o interesse em estudos com foco na população global (CAMPBELL et al., 2007; WASHINGTON; TWOMEY, 2016). A Organização das Nações Unidas projeta, como cenário mediano, uma população de 9,7 bilhões de habitantes em meados do século XXI e 11,2 bilhões de habitantes no final do século (ONU, 2015). Dessa forma, a crescente população mundial deve impulsionar a demanda por alimentos, rações, fibras e bioenergia, sendo que a produção de alimentos deve aumentar cerca de 70% até 2050 e duplicar ou triplicar até 2100 (FAO, 2009; CLAY, 2011; CRIST; MORA; ENGELMAN, 2017). Galloway et al. (2017) realizaram projeções em relação ao uso do nitrogênio (N) para alimentar a população mundial em 2050 sob três cenários de consumo de proteína *per capita*, e os resultados projetados para o uso anual de N em 2050, a partir da produção e consumo de alimentos, variou de 170 a 320 Tg ano⁻¹ de N reativo. Os estudos em relação ao uso do N para a produção de alimentos, demonstram a importância e a essencialidade dos fertilizantes nitrogenados na nutrição, vestimenta e fornecimento de bioenergia, porém, perdas do nutriente por meio da lixiviação de nitrato (NO₃⁻), volatilização de amônia (NH₃), emissão de óxido nitroso (N₂O), entre outros, podem promover impactos agrônômicos e ambientais nos agrossistemas, sendo esses riscos associados ao uso dos fertilizantes nitrogenados que devem ser melhores equacionados para ajudar a atender às crescentes expectativas da sociedade (SNYDER 2017).

O N é essencial para a produção de milho e para obter um ótimo rendimento em grãos, pois é necessário em grandes quantidades nas proteínas vegetais que ajudam a converter a radiação solar em carboidratos que impulsionam o crescimento das plantas (LADHA et al., 2016). No entanto, de acordo com a Declaração de Nanjing o manejo do N é muito desafiador devido à natureza altamente dinâmica desse nutriente no sistema solo-planta-atmosfera, podendo ser realizadas intervenções no ciclo do N para reduzir a quantidade de N reativo perdida para o ambiente a níveis aceitáveis e sustentáveis em agrossistemas, estuários e ecossistemas (ERISMAN, 2004; GALLOWAY et al., 2008). Assim, Rauan; Johnson (1999) evidenciaram que a eficiência de uso do N para a produção de cereais (trigo, milho, arroz, cevada, sorgo, milheto, aveia e centeio) é de aproximadamente 33%, sendo que os 67% não contabilizados podem representar uma perda anual de US\$15,9 bilhões em fertilizantes nitrogenados. Ladha et al. (2005) avaliando a eficiência dos fertilizantes nitrogenados na produção de cereais (trigo, milho e arroz), observaram que a recuperação global do N do

fertilizante na produção de cereais de primeira safra é estimada entre 30 a 50%. Lassaletta et al. (2014) demonstraram que os valores atuais da eficiência de uso do N são baixos e que mais da metade do N utilizado na fertilização das culturas está sendo perdido no meio ambiente ou mesmo sendo aplicado em solos ricos no nutriente. Dessa forma, Pires et al. (2015) mostraram que o aumento do consumo dos fertilizantes nitrogenados está associado a uma grande redução da eficiência de uso do N nos últimos anos, indicando que o uso ineficiente dos fertilizantes nitrogenados está diretamente relacionado às perdas ambientais.

É necessário aumentar a eficiência de uso do N nos sistemas agrícolas por meio de melhorias das práticas agrônômicas e o desenvolvimento e aplicação adequada de políticas ambientais, a fim de alcançar uma agricultura sustentável (ZHANG et al., 2015). Entre as alternativas propostas para melhorar o rendimento de grãos de milho e de outras culturas, ao mesmo tempo em que minimizam os custos da adubação nitrogenada, o uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada tem recebido muita atenção ultimamente (TRENKEL, 2010; GONZÁLEZ-VILLALBA et al., 2014b; SEMPEHO et al., 2014; TIMILSENA et al., 2015; GUELFY, 2017; SNYDER, 2017). Trabalhos de pesquisa sobre a maior eficiência dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada têm aumentado drasticamente nas últimas décadas (SEMPEHO et al., 2014; CHALK et al., 2015; SNYDER, 2017), e muito provavelmente continuarão aumentando, pois não há atualmente estudos publicados com ^{15}N suficientes comparando: (1) as eficiências dos fertilizantes nitrogenados de liberação lenta *versus* liberação controlada; (2) as eficiências dos fertilizantes nitrogenados de liberação lenta e controlada *versus* fertilizantes nitrogenados revestido com inibidores e/ou (3) o valor residual da ureia de liberação controlada (CHALK et al., 2015; GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018).

Há diversos trabalhos de pesquisa demonstrando o aumento da eficiência de uso do N e no rendimento de grãos de milho, acompanhados por lucros econômicos e redução nas doses de N aplicada ao utilizar fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada (HALVORSON; BARTOLO, 2014; SHAPIRO et al., 2016; ZHENG et al., 2016; GUO et al., 2017; ZHENG et al., 2017). No entanto, os estudos foram realizados em outras regiões do Mundo, sob diferentes condições edafoclimáticas e de solo, o que dificulta a comparação de respostas da cultura do milho à adubação nitrogenada nas condições tropicais do Brasil. Os poucos dados disponíveis sobre o uso de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada para a produção de milho no Brasil, não são replicados em diferentes anos (CIVARDI et al., 2011; GONZÁLEZ-VILLALBA, 2014; MARTINS et al., 2014; SOUZA et al., 2017; GARCIA et al., 2018) ou no espaço (CANCELLIER et al., 2016), fornecendo

informações muito locais, não permitindo generalizar os resultados e extrapolar para outras áreas e sistemas de cultivo de milho. Portanto, um estudo avaliando vários anos e locais faz-se necessário para permitir considerações mais amplas a respeito do manejo da adubação nitrogenada em sistemas de produção de milho distintos com fertilizante nitrogenado de eficiência aumentada.

Este estudo consistiu na aplicação de doses crescentes de N utilizando ureia convencional, *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros e nitrato de amônio. Os fertilizantes nitrogenados foram aplicados em filete, na superfície e sobre palha de cana-de-açúcar em uma única aplicação a 0,1 m de distância das linhas das plantas no estágio fenológico V4 do milho em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho ou em cobertura distribuído manualmente a lanço e em área total em um sistema de sucessão *Brachiaria ruziziensis*/milho. Além disso, foi avaliado modos de aplicação e doses de N utilizando *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho.

O segundo capítulo desta tese enfocou no efeito de doses de N na forma de ureia convencional, *blend* de ureia convencional tratada com NBPT e ureia revestida com enxofre elementar (S^0) e polímeros e nitrato de amônio aplicados em cobertura no estágio fenológico V4 do milho, em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. Os resultados demonstraram que a produção de biomassa seca foi pouco influenciada entre os fertilizantes nitrogenados, diferindo-se apenas do tratamento controle (no estágio R6) e que a maior parte do N foi alocada nos grãos (59%) na colheita. Os resultados deste estudo indicaram que a disponibilidade do N mineral do solo foram semelhantes em todos os tratamentos avaliados, possivelmente, devido as condições climáticas (intensidade e distribuição das chuvas) que se apresentaram como um fator limitante para o rendimento da cultura.

O terceiro capítulo desta tese foi direcionada à análise econômica do manejo da adubação nitrogenada no sistema de cultivo do estudo anterior (capítulo 2). Os resultados mostraram que o *blend* de U+UREP obteve menor lucratividade em relação aos demais fertilizantes nitrogenados avaliados, sendo assim, considerado, uma alternativa economicamente inviável, independentemente das doses e dos anos de cultivos avaliados em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. O acréscimo na produtividade de grãos mostrou uma resposta quadrática às doses de N o que não refletiu em maior produtividade de grãos, além do custo da adubação ser impulsionada pelo preço dos fertilizantes nitrogenados e pelo aumento das doses de nitrogênio.

O quarto capítulo tratou da produção de biomassa seca, acúmulo de N e produtividade de grãos em relação ao modo de aplicação do *blend* de U+UREP no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. Os resultados obtidos no estudo é de grande valia por permitir, em algum momento, reunir outros resultados similares em outros sistemas de produção de milho e desenvolver índices de nutrição de N como uma ferramenta de diagnóstico para monitorar o *status* de N na cultura. Independentemente da dose de N avaliada, quando o *blend* de U+UREP foi aplicado em cobertura foi observado as maiores médias de produção de BS e acúmulo de N pelo milho cultivado em sucessão à cana-de-açúcar. O alto aporte de palha de cana-de-açúcar pode ter dificultado a deposição do fertilizante nitrogenado no sulco promovendo efeito salino com a semente, diminuindo às respostas das plantas de milho à aplicação incorporada do *blend* de U+UREP.

O quinto capítulo dessa tese foi direcionada ao custo e a rentabilidade dos modos de aplicação e doses de N utilizando o *blend* de U+UREP no sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho. Os resultados obtidos mostraram que o maior lucro operacional (65%) e, conseqüentemente, índice de lucratividade (R\$5.226,10) foi obtido com a aplicação incorporada de 150 kg de N ha⁻¹ do *blend* de U+UREP e que a aplicação em cobertura com a dose de 300 kg ha⁻¹, proporcionou os maiores valores de produtividade de grãos, receita bruta e custo operacional total. O aumento nas doses de N resulta em tendência de aumento na produtividade de grãos, mostrando a importância da adubação nitrogenada em um sistema de sucessão cana-de-açúcar/milho por diminuir o preço de equilíbrio dos tratamentos fertilizados, porém não se mostrou como alternativa economicamente viável.

O sexto capítulo consistiu em avaliar o destino do N-fertilizante do *blend* de U+UREP em diferentes órgãos de plantas de milho e determinar a sua eficiência, além de avaliar a volatilização de NH₃ e outros parâmetros de crescimentos da planta quando comparados com a U e o NA em um sistema de sucessão *Brachiaria ruziziensis*/milho. Os resultados obtidos mostram que a adubação com 300 kg de N ha⁻¹ promoveram as maiores perdas por volatilização de NH₃. As condições climáticas (disponibilidade de água no solo proporcionado pela pluviosidade) na safra 2016/17 influenciou a produção de BS e o acúmulo de N. A aplicação dos fertilizantes nitrogenados e doses de N não promoveram diferenças na produtividade de grãos nas duas safras avaliadas, sendo que não foi observado margem de lucratividade na safra 2016/17 e a aplicação de 75 kg de N ha⁻¹ utilizando NA na safra 2016/17 promoveu a maior margem de lucratividade entre os tratamentos. A eficiência de uso do N-Solo pela planta foi a principal fonte de N para as plantas durante o ciclo de cultivo. Os resultados obtidos podem ser uma ferramenta útil para estimar o destino do N-fertilizante em

vários sistemas de cultivo adotando fertilizantes de liberação lenta e/ou controlada como alternativa para melhorar a EUN.

Há vários fatores que podem afetar a EUN e o rendimento das culturas, portanto, é evidente que um certo tipo de fertilizante nitrogenado e/ou tecnologia não ajudará a resolver todas as variáveis acerca dos problemas nos sistemas de cultivo. No entanto, é interessante observar os resultados obtidos, refletir a respeito deles e entender que os fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada pode vir a ser uma ótima alternativa, real e disponível para melhorar a EUN e a produtividade das culturas nos diferentes sistemas de cultivo agrícola (GONZÁLEZ-VILLALBA, 2018). As tomadas de decisões em relação a adoção ou não de qualquer tecnologia e/ou inovação devem estar vinculadas a uma análise econômica, à avaliação das compensações entre os ganhos na produtividade e os custos dos fertilizantes nitrogenados que vão depender da análise de cada agricultor em cada situação específica, especialmente se o ambiente, envolvendo o solo e as condições climáticas forem favoráveis a resposta da fertilização com N.

A integração dos fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada dentro da estrutura global de melhores práticas de manejo de fertilizantes (conceito da gestão 4C's para manejo de fertilizantes), juntamente com outras tecnologias e/ou inovações atuais devem ajudar os agricultores e consultores no desenvolvimento e implementação de planos de manejo de nutrientes. Sistemas de Posicionamento Global (GPS) podem guiar as aplicações dos fertilizantes nitrogenados e outras atividades no campo e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) podem permitir que os agricultores obtenham as informações de referência geográfica sobre os campos. Monitores e sensores podem ser utilizados ajustar as doses de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, e vários processos analíticos para acessar a disponibilidade de nutrientes do solo e os teores nas plantas, sendo esses, parte de um conjunto de tecnologias usadas para aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes (REETZ, 2017).

Além dos propósitos estritamente científicos esta tese também teve objetivos práticos. Os agricultores estão atentos à necessidade de diversificação do negócio, não ficando apenas preso ao cultivo da cana-de-açúcar. A consciência é cada vez maior quanto às vantagens agronômicas e de renda da sucessão de cultura com grãos nas áreas de reforma do canavial. A cana-de-açúcar é uma cultura de ciclo longo e a reposição nutricional convencional nem sempre atende suas necessidades, já que essa lavoura demanda uma grande quantidade de nutrientes. Além dessa dificuldade, a área de cultivo sofre tráfego intenso de máquinas e equipamentos, causando compactação do solo. É importante lembrar que em alguns casos não é possível quebrar o ciclo de algumas pragas e doenças e a produtividade acaba sendo afetada.

Para reduzir esses problemas, a sucessão de cultura entre cana-de-açúcar e um tipo de grão, como soja, milho e amendoim pode ser uma alternativa indicada, trazendo inúmeros benefícios para o solo, além de proporcionar uma renda extra para o produtor. A sucessão de culturas pode promover o controle de plantas daninhas, melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, inclusive em profundidade, e a descompactação do solo devido ao sistema radicular dos grãos. Entretanto, estudos que avaliam o manejo da adubação nitrogenada em sistemas de produção de milho em sucessão à cana-de-açúcar no Brasil são praticamente inexistentes o que dá destaque aos resultados desta tese de doutorado.

REFERÊNCIAS

- CAMPBELL, M.; CLELAND, J.; EZEH, A.; PRATA, N. Return of the population growth factor. **Science**, v. 315, n. 5818, p. 1501-1502, 2007.
- CANCELLIER, E. L.; SILVA, D. R. G.; FAQUIN, V.; GONÇALVES, B. A.; CANCELLIER, L. L.; SPEHAR, C. R. Ammonia volatilization from enhanced-efficiency urea on no-till maize in brazilian cerrado with improved soil fertility. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 2, p. 133-144, 2016.
- CHALK, P. M.; CRASWELL, E. T.; POLIDORO, J. C.; CHEN, D. Fate and efficiency of ¹⁵N-labelled slow- and controlled-release fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 2, p. 167-178, 2015.
- CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 52-59, 2011.
- CRIST, E.; MORA, C.; ENGELMAN, R. The interaction of human population, food production, and biodiversity protection. **Science**, v. 356, n. 6335, p. 260-264, 2017.
- ERISMAN, J. W. The Nanjing Declaration on Management of Reactive Nitrogen. **BioScience**, v. 54, n. 4, p. 286-287, 2004.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **How to Feed the World: Global Agriculture Towards 2050 (Rome, 2009)**. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf>. Acesso em: 23 out. 2018.
- GALLOWAY, J. N.; LEACH, A. M.; ERISMAN, J. W.; BLEEKER, A. Nitrogen: the historical progression from ignorance to knowledge, with a view to future solutions. **Soil Research**, v. 55, n. 6, p. 417-424, 2017.

GALLOWAY, J. N.; TOWNSEND, A. R.; ERISMAN, J. W.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; FRENEY, J. R.; MARTINELLI, L. A.; SEITZINGER, S. P.; SUTTON, M. A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. **Science**, v. 320, n. 5878, p. 889-892, 2008.

GARCIA, P. L.; GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency and nutrient partitioning in maize as affected by blends of controlled-release and conventional urea. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-19, 2018.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestre em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O. Fertilizantes nitrogenados: novas tecnologias. **Informações Agronômicas**, n. 148, p. 12-18, 2014b.

GONZÁLEZ-VILLALBA, H. A. **Blending polymer-sulfur coated and NBPT-treated urea to improve nitrogen use efficiency and grain yield in corn production systems**. 2018. 106p. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, n. 157, p. 1-14, 2017.

GUO, J.; WANG, Y.; BLAYLOCK, A.; CHEN, X. Mixture of controlled release and normal urea to optimize nitrogen management for high-yielding ($>15 \text{ Mg ha}^{-1}$) maize. **Field Crops Research**, v. 204, p. 23-30, 2017.

HALVORSON, A. D.; BARTOLO, M. E. Nitrogen source and rate effects on irrigated corn yields and nitrogen-use efficiency. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 681-693, 2014.

LADHA, J. K.; PATHAK, H.; KRUPNIK, T. J.; SIX, J.; van KESSEL, C. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, v. 87, p. 85-156, 2005.

LADHA, J. K.; TIROL-PADRE, A.; REDDY, C. K.; CASSMAN, K. G.; VERMA, S.; POWLSON, D. S.; VAN KESSEL, C.; RICHTER, D. B.; CHAKRABORTY, D.; PATHAK, H. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems. **Scientific Reports**, v. 6, n. 19335, 2016.

LASSALETTA, L.; BILLEN, G.; GRIZZETTI, B.; ANGLADE, J.; GARNIER, J. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 10, p. 1-9, 2014.

MARTINS, I. S.; CAZETTA, J. O.; FUKUDA, A. J. F. Condições, modos de aplicação e doses de ureia revestida por polímeros na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 3, p. 271-279, 2014.

ONU - ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **2015 Revision of World Population Prospects**. Disponível em: ><http://esa.un.org/unpd/wpp/><. Acesso em: 23 out. 2018.

PIRES, M. V.; CUNHA, D. A; CARLOS, S. M.; COSTA, M. H. Nitrogen-use efficiency, nitrous oxide emissions, and cereal production in Brazil: current trends and forecasts. **Plos One**, v. 10, n. 8, p. 1-19, 2015.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 3, p. 357-363, 1999.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu uso eficiente**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), 2017. 178p.

SEMPEHO, S. I.; KIM, H T.; MUDOFU, E.; HILONGA, A. Meticulous overview on the controlled release fertilizers. **Advances in Chemistry**, v. 2014, p. 1-16, 2014.

SHAPIRO, C.; ATTIA, A.; ULLOA, S.; MAINZ, M. Use of Five Nitrogen Source and Placement Systems for Improved Nitrogen Management of Irrigated Corn. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 6, p. 1663-1674, 2016.

SNYDER, C. S. Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the “4R” concept to optimise crop production and minimise environmental losses. **Soil Research**, v. 55, n. 6, p. 463-472, 2017.

SOUZA, T. L.; GUELF, D. R.; SILVA, A. L.; ANDRADE, A. B.; CHAGAS, W. F. T.; CANCELLIER, E. L. Ammonia and carbon dioxide emissions by stabilized conventional nitrogen fertilizers and controlled release in corn crop. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 5, p. 494-510, 2017.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2015.

TRENKEL, M. E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers**: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2010. 163p.

WASHINGTON, H.; TWOMEY, P. **A Future beyond growth**: towards a steady state economy. Abingdon: Routledge, 2016. 280p.

ZHANG, X.; DAVIDSON, E. A.; MAUZERALL, D. L.; SEARCHINGER, T. D.; DUMAS, P.; SHEN, Y. Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**, v. 528, p. 51-59, 2015

ZHENG, W.; SUI, C.; LIU, Z.; GENG, J.; TIAN, X.; YANG, X.; LI, C.; ZHANG, M. Long-Term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1703-1716, 2016.

ZHENG, W.; LIU, Z.; ZHANG, M.; SHI, Y.; ZHU, Q.; SUN, Y.; ZHOU, H.; LI, C.; YANG, Y.; GENG, J. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system. **Field Crops Research**, v. 205, p. 106-115, 2017.