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

Ureia estabilizada na adubação nitrogenada de cana-de-açúcar

Lílian Angélica Moreira

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

**Piracicaba
2017**

Lílian Angélica Moreira
Engenheira Agrônoma

Ureia estabilizada na adubação nitrogenada de cana-de-açúcar

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RAFAEL OTTO**

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

Piracicaba
2017

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

Moreira, Lílian Angélica

Ureia estabilizada na adubação nitrogenada de cana-de-açúcar/ Lílian Angélica
Moreira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - -
Piracicaba, 2017.

67 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de
Queiroz”.

1. *Saccharum* spp. 2. Nitrogênio 3. Acúmulo de nutriente 4. Atividade
enzimática 5. Inibidor de urease 6. NBPT I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Leonardo Moreira e Maria Margarida Moreira pelo apoio, confiança e por me guiarem.

A minha irmã Vívian, pela amizade e carinho.

Aos meus avós, pelo exemplo de perseverança.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que me permitiu estar aqui para realização deste trabalho, que é uma das etapas na busca de um sonho maior, e pela oportunidade.

Ao Professor Doutor Rafael Otto, pela exemplar orientação, ensinamentos internimáveis, incentivo, amizade e paciência.

Aos professores José Lavres Junior, Godofredo César Vitti e Ricardo Antunes de Azevedo pelo auxílio, dedicação, transmissão de conhecimentos durante o processo e pelo espaço concedido.

Ao Dr. Heitor Cantarella, pela contribuição na estruturação do projeto e realização.

Aos funcionários da ESALQ/USP e CENA/USP em especial a Cleusa Pereira Cabral, Salete Aparecida Gaziola pelo suporte laboratorial e técnico, companhia, e amizade, sem eles não seria possível.

À Silvia Helena Carvalho pela atenção, paciência e amizade.

À ESALQ/USP, ao Departamento de Ciência do Solo e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela grande oportunidade, qualidade de ensino e oportunidades abertas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos colegas de pós-graduação, Acácio B. de Mira, Camilo E. Bohorquez, Sarah Tenelli, Saulo A. Q. de Castro, Thales M. Schmiedt e em especial a Rafaela A. Migliavacca, pela amizade e ajuda ao longo destes dois anos.

A usina do Grupo Cofco – Unidade de Potirendaba e usina São João – Araras e seu fornecedor pela concessão das áreas experimentais.

À Koch Agronomic Services pelo financiamento e suporte no projeto.

Ao GAPE e aos estagiários, pelo auxílio e participação durante a execução do projeto, pelo empenho e motivação.

Os meus orientadores de graduação pelo incentivo e conhecimentos transmitidos que me trouxeram até aqui.

À minha família, pelo exemplo de trabalho, amor, carinho e companheirismo.

A todos que de alguma maneira participaram ou contribuíram para realização deste trabalho e para o meu desenvolvimento pessoal.

MUITO OBRIGADA!

EPÍGRAFE

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

Simone de Beauvoir

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. HIPÓTESE E OBJETIVO	17
2.1. Hipótese	17
2.2. Objetivo.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Caracterização das áreas experimentais	23
4.2. Instalação e Condução dos experimentos	25
4.3. Delineamento experimental e tratamentos	25
4.4. Número de perfilhos.....	26
4.5. Índice SPAD	26
4.6. Análises nutricionais	26
4.7. Determinação enzimáticas	26
4.8. Acúmulo de nitrogênio na parte aérea	27
4.9. Produtividade e atributos tecnológicos	28
4.10. Análise Estatística	28
5. RESULTADOS.....	29
5.1. Experimento 1	29
5.2. Experimento 2	37
6. DISCUSSÃO	49
7. CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS.....	59

RESUMO

Ureia estabilizada na adubação nitrogenada de cana-de-açúcar

A adubação nitrogenada de soqueira de cana-de-açúcar no Brasil normalmente é feita no período seco do ano e a principal fonte de N é o nitrato de amônio, apesar de a ureia ser o principal fertilizante nitrogenado consumido no Brasil e no mundo. Para viabilizar o uso de ureia em áreas de cana-de-açúcar colhida sem queima, com grande quantidade de palha recobrindo o solo, devem ser adotadas estratégias que reduzam as perdas de amônia por volatilização, como uso de ureia estabilizada com inibidores de urease. Trabalhos prévios indicaram a necessidade de aumentar a concentração do inibidor de urease NBPT na ureia para reduzir perdas de amônia por volatilização em áreas de cana-crua, porém os efeitos na produtividade da cultura ainda não foram estudados. A hipótese deste trabalho é de que o aumento da concentração do inibidor de urease NBPT na ureia irá proporcionar ganhos de produtividade comparado à ureia convencional, demonstrando a viabilidade do uso de ureia estabilizada para adubação de soqueira de cana-crua. O presente trabalho foi executado em dois locais (Experimento 1, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura muito argilosa e Experimento 2, Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico de textura média) para avaliar o comportamento produtivo de soqueiras de cana-de-açúcar em função de doses de N nas formas de nitrato de amônio, ureia e ureia estabilizada com diferentes concentrações de NBPT. O delineamento experimental foi de blocos inteiramente casualizados no esquema fatorial $6 \times 2 + 1$, sendo seis fontes de N (nitrato de amônio, ureia e ureia estabilizada com quatro doses de NBPT variando de 530 a 2000 mg kg⁻¹), duas doses de N (50 e 100 kg ha⁻¹ de N) e um tratamento adicional (Controle, sem adubação nitrogenada). Foram avaliados o perfilhamento, teor foliar de N, índice SPAD, produtividade de colmos, acúmulo de N na parte aérea e os atributos tecnológicos. Também foi avaliada a atividade enzimática da glutamina sintetase (GS) e nitrato redutase (NR) no Experimento 2. Os dados foram submetidos a análise de variância ao nível de 10 % de significância pelo teste F, e os fatores significativos foram comparados pelo teste Tukey a 10 % de significância. Os teores foliares de N não foram alterados pela interação dos fatores, sendo mais importante o aumento da dose de N, o que também ocorreu para atividade das enzimas GS e NR e para o índice SPAD. A produtividade de colmos foi influenciada distintamente entre as áreas. No Experimento 1, houve resposta significativa para as doses de N, independente da fonte de N. No Experimento 2 não houve diferença significativa na produtividade de colmos entre as doses e fontes de N. Os resultados deste trabalho indicam que não é necessário aumentar a concentração de NBPT na ureia e que, tanto a ureia convencional quanto a ureia estabilizada podem ser utilizadas para adubação nitrogenada de soqueira de cana-de-açúcar como fontes opcionais ao nitrato de amônio.

Palavras-chave: *Saccharum spp.*; Nitrogênio; Acúmulo de nutriente; Atividade enzimática; Inibidor de urease; NBPT

ABSTRACT

Stabilized urea in nitrogen fertilization of sugarcane

Nitrogen fertilization of sugarcane ratoon in Brazil is usually performed in the dry period of the year and the main source of N is ammonium nitrate, although urea is the main nitrogen fertilizer consumed in Brazil and in the world. In order to allow urea usage in green cane trash blanketing (GCTB) systems, with high amount of straw left on soil surface, strategies that reduce ammonia losses are required, such as the use of urea stabilized with urease inhibitors. Previous research indicated the need to increase the concentration of the urease inhibitor NBPT in urea to reduce ammonia losses in GCTB systems, but the effects on such increase on yield performance is unclear. This study was undertaken to test the hypothesis that increasing the concentration of NBPT in urea will provide yield gains when compared to untreated urea, demonstrating the feasibility of using stabilized urea in GCTB areas. Two field trials (Experiment 1, Oxisols of very clayey texture and Experiment 2, medium-texture Oxisols) were set up to evaluate the yield performance of sugarcane fertilized with N rates as ammonium nitrate, urea and urea stabilized with different concentrations of NBPT. The experimental design was a complete randomized blocks on factorial scheme $6 \times 2 + 1$, with six N sources (ammonium nitrate, urea and urea stabilized with NBPT concentration ranging from 530 to 2000 mg kg⁻¹), two doses of N (50 and 100 kg ha⁻¹ of N) and an additional control (no N fertilization). It was evaluated the tillering, foliar N content, SPAD index, crop yield, shoot N accumulation and the technological attributes. The enzymatic activity of glutamine synthetase (GS) and nitrate reductase (NR) was also evaluated in Experiment 2. Data were submitted to analysis of variance at the 10 % level of significance by the F test, and the significant factors were compared by the Tukey test at 10 % significance. Leaf N contents weren't affected by the interaction of the factors, being more important the increase of the dose of N, which also occurred for the activity of GS, NR and for the SPAD index. Sugarcane response to N fertilization varied among sites. In Experiment 1, there was a significant response to N rates, independently of N sources evaluated. In Experiment 2 there was no significant effect of N sources or rates on sugarcane yield. The results of this study indicate that increasing NBPT concentration in urea will not improve sugarcane yield. However, both urea and stabilized urea resulted in similar yield performance when compared to ammonium nitrate for fertilization of GCTB systems.

Keywords: *Saccharum spp.*; Nitrogen; Nutrient accumulation; Enzymatic activity; Urease inhibitor; NBPT

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Dados climáticos do período experimental para região de Araras/SP - experimento 1 (A) e Potirendaba/SP - experimento 2 (B)..... 23
- Figura 2.** Coeficiente de correlação de pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais na folha diagnóstico determinadas aos 120 dias após adubação. °,*,** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F 30
- Figura 3.** Box-plot do número de perfilhos por metro (a) e índice SPAD (b) em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as médias das doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N 31
- Figura 5.** Box-plot da produtividade de colmos (TCH) em função da quantidade de N aplicada. Letras maiúsculas diferem a média do Controle (0) para os demais tratamentos e letras minúsculas diferem a média entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de n. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N 34
- Figura 6.** Influência da adição NBPT a ureia na produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar colhida sem queima com diferentes doses de N. Linha tracejada representa a média 34
- Figura 7.** Box-plot do teor de N na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas diferem a média do Controle (0) para os demais tratamentos e letras minúsculas diferem a média entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N 38
- Figura 8.** Coeficiente de correlação de pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais determinadas na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação. °,*,** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F 38
- Figura 9.** Box-plot do número de perfilhos (A) e índice SPAD (B) avaliados aos 60 dias após a adubação em função da quantidade de N adicionada. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N..... 39
- Figura 10.** Box-plot da atividade das enzimas glutamina sintetase (GS, em A) e nitrato redutase (NR, em B) aos 60 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N 40
- Figura 11.** Box-plot do teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função da quantidade adicionada (A) e fontes (B) de N. Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis Controle (0) e demais tratamentos e letras maiúsculas representam a diferença entre as fontes obtidas pelo teste tukey a 10 % de probabilidade. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N (A) e fonte de N (B)..... 41
- Figura 12.** Coeficiente de correlação de pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais determinadas na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação. °,*,** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F 42
- Figura 13.** Box-plot do número de perfilhos (a) e índice spad (b) avaliados aos 120 dias após a adubação em função da quantidade de N adicionada. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N ... 43
- Figura 14.** Box-plot da atividade das enzimas glutamina sintetase (gs, em a) e nitrato redutase (nr, em b) aos 120 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N 44
- Figura 15.** Distribuição do nitrogênio na planta em Cm (colmos), Pt (ponteiros) e Fs (folha seca) em função das doses de N. Os valores demonstrados foram obtidos com as médias do fator fonte dentro de dose de N..... 46
- Figura 16.** Influência da adição NBPT a ureia na produtividade da cana-de-açúcar colhida sem queima com diferentes doses de N. Linha tracejada representa a média 47

Figura 17. Variabilidade da produtividade nas áreas experimentais em função da aplicação de fontes e doses de N55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise química e física para classificação dos solos das áreas experimentais	24
Tabela 2. Resultados da análise química para avaliação da fertilidade do solo.....	25
Tabela 3. Teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições.....	29
Tabela 4. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 120 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições.....	30
Tabela 5. Acúmulo de N nos colmos (Cm), ponteiros (Pt), folha secas (Fs) e total (Nplanta) em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições	32
Tabela 6. Produtividade de colmos em função dos fatores fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições	33
Tabela 7. Atributos tecnológicos e produtividade de açúcar (TPH) da cana-de-açúcar em função de fontes e doses de N aplicadas no início da brotação. Valores representam a média de quatro repetições	36
Tabela 8. Teor de N na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam média de quatro repetições.....	37
Tabela 9. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 60 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições.....	39
Tabela 10. Teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições.....	41
Tabela 11. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 120 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a media de quatro repetições.....	42
Tabela 12. Acúmulo de N nos colmos (Cm), ponteiros (Pt), folha secas (Fs) e total (Nplanta) em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições	45
Tabela 13. Produtividade de colmos em função de fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições.....	46
Tabela 14. Atributos tecnológicos e produtividade de açúcar (TPH) em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições	48

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum* L., originada no sudeste asiático e introduzida no Brasil no século XVI. Seu cultivo se expandiu significativamente devido aos produtos de sua industrialização, o açúcar e o etanol, sendo o último utilizado principalmente como combustível (CONAB, 2016).

Atualmente a área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil é de 8.973,2 milhões de hectares, sendo este o maior produtor mundial, seguido da Índia e China. A safra brasileira de 20016/2017 prevê crescimento de 2,9 % na produção, sendo o estado de São Paulo responsável pela maior parte da produção nacional, ocupando também primeiro lugar em área cultivada, com 52,3 % da área de cana-de-açúcar do Brasil (CONAB, 2016).

O potencial produtivo da cultura da cana-de-açúcar é estimado em 380 Mg ha^{-1} (WACLAWOVSKY, 2010), porém na última safra a produtividade esperada foi de $76,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ (CONAB, 2016), demonstrando uma amplitude de crescimento de aproximadamente 500 %. Uma meta ambiciosa, visto que a produtividade máxima é determinada com uma base teórica do potencial fisiológico da cultura, ou seja, para expressar essa produtividade todos os fatores de produção deveriam ser ótimos. No entanto, mesmo para incrementos menos significativos, que poderiam levar a produtividade a valores considerados altos, 120 Mg ha^{-1} , é necessário que os fatores influentes no cultivo sejam melhor manejados.

A produtividade é influenciada por diversas variáveis, dentre elas pode-se citar: clima (temperatura, pluviosidade), topografia (inclinação da área), manejo (rotação de cultura, época de plantio, densidade de plantio, controle de pragas e doenças), adubação (tipo e momento) e planta (variedade). Das quais, apenas o adequado manejo da adubação nitrogenada de soqueira pode representar um ganho de 17 % na produtividade (OTTO, 2015). Além disso, a adubação do canavial também corresponde a 15 % dos custos de produção (OTTO, 2012), evidenciando a necessidade de metodologias que tornem esta prática mais efetiva, fazendo este cultivo sustentável para o agricultor (VITTI; MAZZA, 2002).

O uso de fertilizantes é uma medida consagrada no processo produtivo canavieiro, seja no momento do plantio ou em soqueiras. Tal condição é evidenciada pelo consumo de fertilizantes deste setor, tornando a cultura da cana-de-açúcar a terceira maior consumidora de fertilizantes no Brasil, correspondendo a 15 % do total de fertilizante utilizado no país (ANDA, 2010). Porém, de todo o montante de N-fertilizante utilizado, apenas uma pequena porção deste é encontrado na planta de cana-de-açúcar, cerca de 20 % do N-fertilizante aplicado (FRANCO et al., 2011). Isso evidencia as grandes perdas no sistema, resultando em baixa taxa de aproveitamento do N-fertilizante, tornando necessário o desenvolvimento de estratégias que visem aumentar sua recuperação pela planta.

A cultura da cana-de-açúcar consome de 17 a 22 % do fertilizante nitrogenado utilizado no Brasil (CANTARELLA; ROSSETTO 2012). Na região Centro-Sul, o nitrato de amônio é a principal fonte de nitrogênio (N) utilizada nos canaviais, enquanto no Nordeste destaca-se o sulfato de amônio. Esse comportamento difere do contexto nacional de outras grandes culturas, como café e milho, em que a principal fonte de N é a ureia. De fato, do total de fertilizante nitrogenado utilizado no Brasil em 2013, 64 %, 18 % e 15 % foram consumidos como ureia, sulfato de amônio e nitrato de amônio, respectivamente (ANDA, 2015). Além disso, existe uma tendência de aumento da produção nacional de ureia no Brasil devido à expansão de fábricas de fertilizantes nitrogenados. Concomitantemente, este é o fertilizante que apresenta o menor custo unitário de N

e aliado a isso há uma predisposição na diminuição do consumo de nitrato de amônio no Brasil, a exemplo de outros países como os da Europa, devido ao possível uso de nitrato de amônio na fabricação de explosivos. Outro fator complicador do uso de nitrato de amônio e, portanto, direcionando o setor sucroenergético ao uso de ureia é o armazenamento deste produto. Durante a estocagem há grande dificuldade de manutenção da qualidade física do nitrato de amônio devido ao seu alto índice de higroscopicidade.

Um fator limitante para o uso de ureia no setor sucroenergético é a sua baixa eficiência comparada ao nitrato de amônio, resultante em parte da facilidade de perda por volatilização de amônia oriunda da ureia, processo que se agrava devido ao manejo empregado na cultura da cana-de-açúcar atualmente, sendo colhida sem queima (VITTI et al., 2007). Este cenário representa um novo campo de trabalho e novos desafios na utilização da ureia como fonte de N no setor sucroenergético.

Atualmente a colheita da cana-de-açúcar cultivada na região Sudeste é realizada mecanicamente, deixando sobre o solo uma quantidade de palhada que pode variar de 10 a 20 Mg ha⁻¹ de massa seca (FORTES et al., 2012; LEAL et al., 2013). Diante desta situação e da dificuldade de incorporação do fertilizante devido à palhada remanescente, cria-se uma demanda por fertilizantes que aplicados sobre a palha não reduzam sua eficiência. Uma saída para esta situação é o uso de ureia estabilizada, ou seja, com adição de inibidores do processo de volatilização, pois a perda de N oriunda da volatilização é a principal causa da ineficiência da ureia. Diante disso e do fato de a ureia apresentar o melhor custo-benefício, ou seja, menor preço por quilo de N contido no fertilizante (KIEHL, 1989), algumas opções de produtos estão disponíveis no mercado.

O setor de fertilizantes tem apresentado algumas estratégias visando aumento da eficiência do N-ureia, por meio da utilização de inibidores que atuam competitivamente pelo sítio de ação na enzima urease ou pelo uso de inibidores de nitrificação. Adjunto a isso pode-se ter a ureia recoberta com enxofre elementar, uso de polímeros no revestimento da ureia, adição de sais e adição de micronutrientes (VITTI et al., 2002; CANTARELLA et al., 2007). Porém alguns destes têm apresentado resultado variável nas diversas culturas plantadas no país (CANTARELLA et al., 2007), levando insegurança aos produtores quanto a sua utilização e eficiência.

Dentre os vários produtos desenvolvidos, a ureia estabilizada com NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida), molécula que atua como inibidor da atividade da enzima urease, tem se destacado para diversas condições climáticas, de solo e culturas no Brasil. Entretanto, seu uso na cultura da cana-de-açúcar ainda é restrito, uma vez que tem apresentado resultados controversos (CONTIN, 2007; BARTH, 2009;). O desafio de utilização da ureia estabilizada com NBPT em cana-de-açúcar, comparativamente à utilização em outras culturas como o milho e trigo, deve-se ao fato de a adubação de soqueira ocorrer predominantemente no período seco do ano e com presença de grande quantidade de palhada, muito superior à quantidade encontrada em áreas de milho e trigo.

A variabilidade dos resultados do uso de ureia estabilizada na cultura da cana-de-açúcar pode ser explicada pela grande influência na atividade da urease pela umidade, temperatura, pH, teor de matéria orgânica (LONGO; MELO, 2005) e até mesmo pela concentração de NBPT utilizada nos produtos comerciais. Atualmente, a ureia estabilizada com NBPT comercializada no Brasil apresenta concentração média de 530 mg kg⁻¹ de NBPT na ureia. Porém, devido à elevada quantidade de palha que recobre o solo em áreas de cana-crua, pode ser necessário aumentar a concentração de NBPT para viabilizar o uso de ureia para adubação de soqueira. De fato, Mira (2016) observou que aumentando a concentração de NBPT na ureia até 1.000 mg kg⁻¹

há redução das perdas de amônia por volatilização quando comparado à ureia convencional e ureia estabilizada com NBPT em concentrações mais baixas. Deste modo, estudos adicionais são necessários para avaliar se o aumento da concentração de NBPT na ureia promove maior rendimento na produtividade de cana-de-açúcar.

2. HIPÓTESE E OBJETIVO

2.1. Hipótese

Em sistema de cana-crua é necessário aumentar a concentração de NBPT na ureia.

2.2. Objetivo

Avaliar parâmetros produtivos da cana-crua submetida ao aumento da concentração de NBPT na ureia.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Nitrogênio (N) é um macronutriente normalmente encontrado nos tecidos das plantas em teores variando entre 1 e 5 dag kg⁻¹ (MARSCHNER, 2012) sendo, com frequência, o nutriente determinado em maior quantidade nas análises foliares de rotina. No cultivo da cana-de-açúcar o N é exigido em grandes quantidades, demandando uma adubação de 225 kg ha⁻¹ de N, para uma produtividade de 120 Mg ha⁻¹ de colmos (FREIRE, 2001). Entretanto na adubação de soqueira utiliza-se normalmente 80-120 kg ha⁻¹ de N (OTTO et al., 2016), que é inferior à quantidade absorvida pelas plantas, deixando para o solo a responsabilidade do suprimento restante de N para a cultura.

No solo o N está presente em diversos estados de oxirredução, variando de +6 a -3 apresentando-se em diversas formas, NO₃⁻, NH₄⁺, NO₂⁻ e formas orgânicas, as quais podem representar 90 % do N total do solo (OTTO et al., 2013; YAMADA; ABDALLA, 2000), o que demonstra grande complexidade e plasticidade no ciclo deste nutriente. O N é absorvido principalmente na forma de NO₃⁻ e NH₄⁺ pelas plantas, mas moléculas como a ureia também podem participar deste processo (FERNANDES, 2006). A absorção do N depende da sua disponibilidade no meio externo a planta, da disponibilidade de água, uma vez que é o meio no qual o íon se difundirá, e da disponibilidade de outros nutrientes como P, K, Ca, Mg, S, B e Ni, os quais possuem maiores interações com absorção do N pela planta.

Após serem absorvidos, os íons NO₃⁻ e NH₄⁺ possuem duas rotas de movimentação na planta sendo elas: simplástica ou apoplástica. No entanto, a assimilação do N ocorre apenas na forma de NH₄⁺ (FERNANDES, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2013), desta maneira o N absorvido na forma de NO₃⁻ sofre um processo redutivo a amônio. As modificações químicas decorrentes da redução do nitrato são consideradas onerosas energeticamente, pois consomem 15 mols de adenosina trifosfato (SALSAC et al., 1987). Além disso, demandam grandes quantidades de elétrons, os quais são concedidos pela via glicolítica indiretamente através da dispensa de NADH ou NADPH (BEEVERS et al., 1969). Este processo realizado primeiramente pela enzima nitrato redutase (NR) resulta na formação de nitrito, elemento tóxico as plantas e rapidamente convertido a NH₄⁺, que será adicionado a molécula de glutamato pela glutamina sintetase (GS) produzindo a glutamina, constituinte básico de diversos aminoácidos e primeiro composto orgânico nitrogenado formado na planta (EPSTEIN; BLOOM, 2006). As diferentes relações apresentadas entre os distintos fatores têm levado a pesquisas, resultando em relações entre as atividades das enzimas nitrato redutase e glutamina sintetase e produtividade (HIREL et al., 2007; CRUCHAGA et al., 2013), demonstrando a possibilidade do uso desta ferramenta no âmbito da diagnose nutricional.

A grande quantidade de estudos relacionados ao N na planta justifica-se pelas funções primordiais por ele exercida, como: participação na estrutura de aminoácidos, ácidos nucléicos e proteínas, a qual destaca-se a clorofila (TAIZ; ZEIGER, 2013), influenciando diretamente o processo fotossintético da planta. Além disso, este nutriente participa da ativação de enzimas e do balanço cátion-ânion das células. O sintoma mais característico da deficiência do N é a clorose uniforme das folhas velhas, decorrente da alta mobilidade do nutriente no floema, como íon livre ou metabolito.

A caracterização sintomática advém do processo de amarelecimento das folhas oriundo da modificação estrutural da molécula de clorofila em cadeias menos reativas, resultando no decréscimo do teor de clorofila (HÖTENSTEINER; FELLER, 2002). A redução da clorofila desencadeada pelo déficit de N provoca

diversas modificações bioquímicas nas plantas, como aumento de carotenóides e xantofilas que são energeticamente mais econômicos para o metabolismo da planta e necessitam de menor quantidade de N para a formação de suas estruturas (TAIZ; ZEIGER, 2013). Portanto, em condição limitante de N o processo de degradação da clorofila justifica-se pela sua composição química, onde cerca de 70 % do N da planta está acumulado (HIREL et al., 2005).

Uma medida simples utilizando o equipamento Konica-Minolta SPAD-502, o qual fornece o índice de verde da planta possui boa correlação com teor de clorofila e indiretamente pode correlacionar-se com o teor de N total da planta, facilitando o diagnóstico nutricional (ARGENTA et al., 2001; GUIMARÃES et al., 1999; TURNER; JUND, 1991). Porém na cultura da cana-de-açúcar esta correlação ainda não foi encontrada, uma vez que os trabalhos apresentados até o momento são divergentes e em sua maioria não possuem correlação entre N total, índice SPAD e produtividade.

A adubação adequada da cana-de-açúcar é primordial para o desenvolvimento da planta, pois corresponde a grande parte do incremento em produtividade a ser obtido. Dentre os fertilizantes, os nitrogenados ganham destaque principalmente em soqueiras, onde há maior responsividade da cultura à adubação (FRANCO et al., 2011). Alinhado a isso, têm-se que dentre as fontes comerciais de N a ureia é a principal, pois possui alto teor de N, variando de 44 a 46 % (URQUIAGA; MALAVOLTA, 2002).

A forma amídica do N presente na ureia é rapidamente convertida a amônio após sua hidrólise no solo, formando NH_4^+ . Está seria uma vantagem para cultura, pois acredita-se que este possa proporcionar maior rendimento devido ao menor gasto energético para sua assimilação. Porém existe uma desvantagem no uso da ureia, uma vez que sua eficiência agrônômica pode ser comprometida por perdas no sistema solo-planta, principalmente através da volatilização de amônia (CANTARELLA et al., 2008). Outros processos de perdas também podem ocorrer para o N da ureia, assim como para o N de outros fertilizantes, como lixiviação, desnitrificação e imobilização, processos normais do ciclo do N, que podem reduzir a disponibilidade do nutriente para a planta (CANTARELLA et al., 2008).

A imobilização é um forte fator de indisponibilidade, por outro lado, pode ser também considerada um estoque de N no solo, por ser uma perda passível de retornar ao sistema (LARA CABEZAS; COUTO, 2007). Este processo ocorre devido à pequena disponibilidade de N no solo, levando os microrganismos a utilizarem o N fornecido via fertilizante para seu metabolismo básico. A imobilização normalmente ocorre quando a relação C/N de materiais orgânicos adicionados ao solo está acima de 30/1, levando a uma competição pela disponibilidade do N do solo entre as plantas e os microrganismos. Isso é bastante recorrente em áreas com cana-de-açúcar, visto que a palhada residual do processo de colheita da cana-de-açúcar apresenta relação C/N elevada e normalmente superior a 60/1 (FRANCO, 2008; FORTES; TRIVELIN; VITTI, 2012; MARIANO et al., 2015).

Outro mecanismo contribuinte para a perda do N é a lixiviação, que pode ocorrer nas condições brasileiras. Uma vez que o N na forma de nitrato possui ligação fraca aos colóides dos solos altamente intemperizados, pode ser percolado no perfil do solo e conseqüentemente há aumento da ineficiência dos fertilizantes. Entretanto, a magnitude das perdas de N por lixiviação em condições tropicais é muito variada (GHIBERTO et al., 2011; GHIBERTO, LIBARDI, TRIVELIN, 2015), sendo normalmente observadas em pequena escala devido ao potencial de ligação do ânion nitrato às cargas positivas dos óxidos de ferro e alumínio em camadas mais profundas do perfil do solo.

Dentre todos os processos de perdas do N no sistema solo-planta associados à ureia, a volatilização é o mais importante e por isso muito estudado, uma vez que as perdas do N por volatilização podem chegar a 78 % do N aplicado em superfície como mostrado por Lara Cabezas et al. (1997a, 1997b, 2000). A volatilização do N ocorre quando a enzima urease utiliza a molécula de ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) como substrato na presença de água, formando NH_4^+ . Essa reação é caracterizada pela elevação do pH ao redor do grânulo, devido a utilização de prótons do meio, como pode ser observado na reação a seguir:

Segundo Koelliker e Kissel (1988) está é a reação predominante em solos com pH ácidos, os quais representam a maior quantidade no Brasil. O NH_4^+ , produto da reação pode ser absorvido pelas plantas ou transformado rapidamente em NH_3 , um gás facilmente perdido até mesmo por difusão em profundidade do solo até a superfície, como observa-se:

A atividade da enzima urease, responsável pela hidrólise da ureia, é influenciada por diversos fatores como a umidade, temperatura, pH, quantidade de enzima presente no sistema e atividade de microrganismos. Associado a estes fatores tem-se a interferência do solo em um grande número destes, causando grande variações nas taxas de volatilização. Dentre os fatores capazes de alterar a volatilização, destaque-se a quantidade de material vegetal residual presente na área, o que atualmente tornou-se uma preocupação devido a proibição da queima, encontrando-se comumente uma massa residual da ordem de 10 a 20 Mg ha^{-1} (LEAL et al., 2013; FRANCO et al., 2008; FORTES et al., 2012).

Barreto e Westerman (1989), demonstraram maior atividade da enzima urease em sistema de plantio direto, com manutenção da palha na superfície do solo. Situação condizente com a dos canaviais, confirmando a possibilidade de maiores perdas do N aplicado via ureia por volatilização. Por outro lado, o aumento da atividade enzimática também acontece quando a umidade e/ou temperatura permanecem elevadas (ERNEST; MASSEY, 1960), o que não ocorre quando a adubação de soqueira de cana-de-açúcar é realizada no período seco e com temperaturas mais baixas do ano, representando o período de adubação de soqueira na região Sudeste do Brasil. Por isso, a utilização de ureia como fonte de N em sistema de cana-crua só poderá ser viabilizada se forem adotadas estratégias para mitigar as perdas de NH_3 por volatilização, como por exemplo a utilização de ureia estabilizada, ou seja, tratada com inibidores de urease.

Segundo Watson (2000), os inibidores da atividade da urease PPD (fenil-fosforodiamidato) e NBPT têm sido os mais eficientes. O PPD é rapidamente transformado no solo em seu análogo, um fenol, de baixa eficiência inibidora. Já o NBPT por possuir características similares a ureia tem se mostrado o mais promissor e eficiente na mistura com a ureia para o controle da atividade da urease (OLIVEIRA et al., 2014). Entretanto, em condições de aplicação sobre a palhada, apresenta resultados controversos, tendo eficiência em apenas determinadas culturas (CANTARELLA, 2007; CANTARELLA et al., 2008).

O NBPT assim como o PPD não é inibidor direto da enzima urease. Para que este se torne eficiente ele deve ser transformado no solo em seu análogo, sendo o NBPTO (fosfato de N-n-butiltriamida) o real inibidor da enzima urease e análogo ao NBPT (BREMNER; CHAI, 1986; WATSON, 2005). Essa transformação ocorre em taxas variáveis, sendo influenciada pelas mesmas condições capazes de alterar a atividade da urease (WATSON, 2000), como quantidade de cobertura vegetal e até mesmo pela concentração de NBPT adicionada à ureia.

O uso do NBPT pode ser viável para o melhor aproveitamento da ureia, principalmente no período mais seco do ano (maio a setembro), época da adubação de soqueira na região Sudeste do Brasil. Todavia, a concentração de NBPT usualmente empregada em produtos comerciais (530 mg kg^{-1}) tem apresentado resultados pouco eficientes nos canaviais, o que foi evidenciando por Cantarella et al. (2008). Mira (2016) observou que o aumento da concentração de NBPT até 1.000 mg kg^{-1} foi eficaz em reduzir o potencial de perdas de amônia por volatilização da ureia em áreas de cana-crua. Entretanto, o autor não observou vantagem quando foram adicionadas concentrações entre $1.000 - 2.000 \text{ mg kg}^{-1}$. Em uma meta-análise recente, Silva et al. (2016) observou perdas médias de N na forma de amônia de 31 e 16 % respectivamente para ureia convencional e ureia estabilizada com NBPT. Apesar do potencial em reduzir perdas da ordem de 50 %, os autores observaram que o efeito na produtividade de diversas culturas foi limitado a 5 %, demonstrando que o N pode não ser o fator limitante a produtividade na maioria das situações. Diante do exposto, este trabalho foi desenvolvido para comprovar se a redução na volatilização de amônia proporcionada pelo aumento na concentração de NBPT irá resultar em ganhos de produtividade da cultura da cana-de-açúcar em condições de campo do Brasil.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização das áreas experimentais

Foram conduzidos dois experimentos. O primeiro localizado em Araras/SP (22°24'38.9"S; 47°24'38.9"W, 620 m alt.), onde o clima segundo Koeppen é do tipo Cwa, com temperatura média de 21,6 °C e precipitação pluvial de 1300 mm por ano. A área experimental 2 pertence ao Grupo Cofco e se situa próximo a cidade de Potirendaba/SP (21°2'56.8"S; 49°30'48.6"W, 490 m alt.) onde o clima segundo Koeppen é do tipo Aw com temperatura média de 30 °C e precipitação pluvial de 1.200 mm por ano. Os dados climatológicos dos períodos experimentais foram obtidos na estação meteorológica da UFSCAR (Experimento 1) ou fornecidos pela própria Usina (Experimento 2) (Figura 1). A variedade cultivada no experimento 1 foi a RB85 5536, caracterizada como altamente produtiva, ciclo intermediário e exigente nutricionalmente. A variedade cultivada no experimento 2 foi a RB96 6928 de alta produtividade agrícola, ciclo precoce e exigente nutricionalmente.

Antes da instalação dos experimentos, foi realizada amostragem de solo em ambas áreas para caracterização do solo. Foram colhidas 5 subamostras por experimento até 1,0 m de profundidade (separadas a cada 0,2 m), que foram homogeneizadas e encaminhadas para o laboratório. Foi realizada análise para fins de classificação do solo (EMBRAPA 2013), além de análise granulométrica pelo método do hidrômetro (GEE; OR, 2002). Com base nos resultados das análises químicas e físicas (Tabela 1), assim como verificação da cor do solo no campo, os solos foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico de textura muito argilosa (Experimento 1) e Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico argissólico de textura média (Experimento 2) (EMBRAPA, 2013). As amostras das camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m também foram analisadas para fins de fertilidade do solo, conforme Raij et al. (2001) (Tabela 2).

Figura 1. Dados climáticos do período experimental para região de Araras/SP - Experimento 1 (A) e Potirendaba/SP - Experimento 2 (B)

Tabela 1. Resultados da análise química e física para classificação dos solos das áreas experimentais

Prof.	pH	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	m	M.O.	Areia	Silte	Argila
m	H ₂ O	KCl	mg kg ⁻¹	mmol _c kg ⁻¹					%			g kg ⁻¹	dag kg ⁻¹			
Experimento 1 - LVAd																
0-0,2	5,5	4,8	8,0	4,0	25,0	14,0	9,0	80,0	43,0	123,0	35,0	17,0	31,0	20,0	13,1	66,9
0,2-0,4	5,8	5,0	9,0	2,0	33,0	19,0	3,0	68,0	54,0	122,0	44,0	5,0	28,0	19,7	11,0	69,3
0,4-0,6	5,7	4,9	3,0	1,0	17,0	12,0	7,0	60,0	30,0	90,0	33,0	19,0	21,0	18,0	11,5	70,5
0,6-0,8	5,6	4,9	3,0	1,0	12,0	11,0	6,0	59,0	24,0	83,0	29,0	20,0	20,0	17,8	12,2	70,0
0,8-1,0	5,6	4,9	3,0	<0,3	12,0	9,0	10,0	59,0	21,0	80,0	26,0	32,0	18,0	18,1	12,3	69,6
Experimento 2 - LVAe																
0-0,2	6,0	5,1	14,0	0,8	9,0	5,0	2,0	23,0	14,8	37,8	39,0	12,0	11,0	75,2	2,1	22,7
0,2-0,4	5,7	4,8	9,0	0,6	8,0	4,0	2,0	17,0	12,6	29,6	43,0	14,0	7,0	71,9	3,2	25,0
0,4-0,6	5,8	4,5	4,0	0,5	8,0	4,0	3,0	14,0	12,5	26,5	47,0	19,0	6,0	65,5	1,8	32,7
0,6-0,8	5,7	4,6	3,0	0,3	10,0	4,0	2,0	16,0	14,3	30,3	47,0	12,0	6,0	63,2	2,1	34,7
0,8-1,0	5,5	5,0	2,0	0,3	10,0	3,0	<1,0	<10,0	13,3	22,3	60,0	0,0	6,0	62,7	2,8	34,5

pH em água; pH em cloreto de potássio (KCl); fósforo (P) extraído por Mehlich-1 e determinado por colorimetria; potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extraídos com acetato de amônio e determinados respectivamente por espectrofotômetro de emissão atômica e espectrofotômetro de absorção atômica para ambos últimos; alumínio trocável (Al) extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado por titulometria; acidez potencial (H+Al) extração com acetato de cálcio e determinado por titulometria; SB: soma de bases trocáveis; T: capacidade de troca de catiônica a pH 7; V: saturação por bases do solo; m: saturação por alumínio; matéria orgânica (M.O.) determinada por titulometria; areia, silte e argila determinados pelo método Bouyoucos (densímetro)

Tabela 2. Resultados da análise química para avaliação da fertilidade do solo

	Prof.	P	S	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T
	m	— mg dm ⁻³ —					mmol _c dm ⁻³			
Experimento 1	0-0,2	14,0	32,0	2,3	27,0	11,0	2,0	42,0	40,3	82,3
	0,2-0,4	26,0	35,0	1,1	25,0	13,0	2,0	31,0	39,1	70,1
Experimento 2	0-0,2	5,0	6,0	0,6	8,0	4,0	2,0	20,0	12,6	32,6
	0,2-0,4	5,0	13,0	0,4	11,0	6,0	3,0	20,0	17,4	37,4
	V	m	B	Cu	Fe	Mn	Zn	M.O.	pH	
	— % —				mmol _c dm ⁻³			g dm ⁻³	CaCl ₂	
Experimento 1	0-0,2	49,0	5,0	0,38	0,6	29,0	2,3	0,2	35,0	4,9
	0,2-0,4	56,0	5,0	0,57	0,5	21,0	1,2	0,9	29,0	5,3
Experimento 2	0-0,2	39,0	14,0	0,22	0,7	14,0	32,2	0,6	10,0	4,9
	0,2-0,4	47,0	15,0	0,24	0,6	11,0	29,9	0,3	9,0	4,7

fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) extraídos por resina trocadora de íons e determinados respectivamente por colorimétrica, espectrofotômetro de emissão atômica e espectrofotômetro de absorção atômica para ambos últimos; alumínio trocável (Al) extraído com cloreto de potássio 1 mol L⁻¹ e determinado pelo método colorimétrico; acidez potencial (H+Al) método SMP; enxofre (S) extraído com fosfato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ e determinado por turbidimetria; boro (B) determinação colorimétrica e extração com água quente; cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn) e ferro (Fe) determinados por espectrofotometria de absorção atômica e extraídos com DTPA; SB: soma de bases trocáveis; T: capacidade de troca de catiônica a pH 7; V: saturação por bases do solo; m: saturação por alumínio; matéria orgânica (M.O.) determinada por método colorimétrico e pH em CaCl₂

4.2. Instalação e Condução dos experimentos

Os experimentos 1 e 2 foram instalados respectivamente em outubro de 2014 e julho de 2015, aproximadamente 30 dias após a colheita da cana-planta no experimento 1 e primeira soca no experimento 2. A aplicação do fertilizante baseou-se na produtividade esperada e dose usualmente empregada pelas usinas de modo que não houvesse restrição nutricional a planta. Foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, sendo realizada manualmente sobre a palhada e em faixa a cerca de 0,20 m de distância da linha de soqueira.

4.3. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi de blocos inteiramente casualizados no esquema fatorial 6 x 2 + 1, sendo seis fontes de N (nitrato de amônio, ureia e ureia estabilizada com quatro doses de NBPT variando de 530 a 2000 mg kg⁻¹), duas doses de N (50 e 100 kg ha⁻¹ de N) e um tratamento adicional (Controle, sem adubação nitrogenada). Cada tratamento foi instalado com quatro repetições.

As fontes de N foram nitrato de amônio (32 % de N), ureia (44 % de N), e ureia estabilizada com 4 concentrações de NBPT (“Agrotain®” (KochTM)), sendo 530 mg kg⁻¹ (dose comercial), 850 (Experimento 1) ou 950 mg kg⁻¹ (Experimento 2), 1.500 mg kg⁻¹ e 2.000 mg kg⁻¹, denominadas respectivamente de NA, U, U530, U850 (Experimento 1) ou U950 (Experimento 2), U1500 e U2000. As misturas da ureia com o NBPT foram realizadas em laboratório para que o produto final (ureia + NBPT) estivesse pronto o mais próximo possível da data de aplicação do fertilizante em campo, sendo a aplicação realizada aproximadamente uma semana após a mistura da ureia com NBPT.

Cada experimento foi constituído por 52 parcelas, sendo cada parcela constituída de 5 linhas de cana-de-açúcar espaçadas 1,50 m e com 10 m de comprimento. A aplicação do fertilizante nas parcelas foi realizada a 0,20 m da linha de soqueira, de forma manual e sobre a palhada.

4.4. Número de perfilhos

Foram realizadas duas contagens de perfilhos, aos 60 e 120 d (dias) após a adubação no experimento 2, enquanto no experimento 1 a contagem de perfilhos foi realizada apenas aos 120 d. Para essa determinação foram contados os números de perfilhos das 3 linhas centrais de cada parcela, utilizando 6 m centrais de cada linha (Anexo A 1). Esta metodologia teve como objetivo reduzir a interferências de bordadura da parcela e permitir avaliar os efeitos dos tratamentos no perfilhamento inicial da cana-de-açúcar.

4.5. Índice SPAD

O índice de verde da planta foi avaliado pelo método não destrutivo utilizando o equipamento SPAD (modelo Konika-Minolta SPAD 502). O equipamento realiza leituras no comprimento de onda de 650 nm em que a clorofila é capaz de absorver e 940 nm onde não ocorre absorção pela molécula de clorofila, utilizando as leituras para gerar o índice de verde da planta (GIL et al., 2002) (Anexo A 2). As avaliações foram realizadas aos 60 e 120 d após adubação no experimento 2 e aos 120 d no experimento 1. As determinações foram realizadas em 30 folhas TVD (*Top Visible Dewlap*) de diferentes plantas por parcela, obtendo-se um valor médio por parcela.

4.6. Análises nutricionais

Após a determinação do índice SPAD utilizou-se o terço médio das 30 folhas TVD coletadas e estas foram então separadas da nervura central, de modo que, apenas o limbo foliar foi levado ao laboratório, como recomendado por Malavolta et al. (1997) (Anexo A 3 e 4). O material foi armazenado em sacos de papel e levado a estufa de circulação forçada sobre temperatura constante de 65 °C por tempo suficiente para que mantivesse a massa não variável. Em seguida as amostras foram moídas em moinho tipo Willey com peneira de 20 mesh, como recomendado por Malavolta et al. (1997) e o resíduo gerado neste processo foi levado ao micro moinho tipo Willey com mesma peneira (20 mesh), deste modo a amostra final foi constituída da maior quantidade possível do material coletado a campo.

O teor dos nutrientes P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes foi obtido após digestão nitro-perclórica, enquanto o teor de N, determinado em triplicata, foi obtido por digestão sulfúrica seguido de destilação a vapor e titulação. Ambos procedimentos foram realizados conforme Malavolta et al. (1997).

4.7. Determinação enzimáticas

As análises para determinação enzimática foram realizadas apenas no experimento 2, nos tempos 60 e 120 d após adubação. Para realização do procedimento, foram coletadas 15 folhas TVD nas 3 linhas centrais de cada parcela. Adicionalmente separou-se a lâmina foliar do limbo central e do mesmo obteve-se o terço médio o qual em seguida foi imediatamente mantido em N líquido para que o material fosse congelado instantaneamente, resultando na completa inativação do sistema degradativo-fisiológico da planta. O transporte do material para

posterior determinação das análises foi realizado em gelo seco e subsequentemente armazenado em freezer -80 °C. Posteriormente as amostras foram moídas em almofariz com auxílio de N líquido de modo que o material estivesse constantemente congelado e preservado. As análises foram realizadas em triplicatas para maior confiabilidade dos resultados.

4.7.1. Nitrato redutase

A nitrato redutase (NR) foi determinada segundo Cambraia et al. (1989) com adaptações. Inicialmente pesou-se 0,2 g de material vegetal fresco e adicionaram-se 2 mL do meio de extração (tampão tris-HCl 0,1 M pH 8,1, NiSO_4 4mM e glutatona reduzida 20 mM), homogeneizando a mistura. Em seguida utilizou-se 0,2 mL do extrato obtido com 1,8 mL do meio de reação, o qual constitui-se de 200 mmol L^{-1} de tampão tris-HCl pH 7,5, triton X-100 1 %, 20 mmol L^{-1} de KNO_3 e 0,1 mmol L^{-1} de NADH. A mistura foi incubada por 10 min a 37 °C e em seguida paralisou-se a reação com acréscimo ao meio de uma mistura de N- naftil etilenodiamino 0,01 % (meio HCl 1 mol L^{-1}) e 2 mL de sulfanilamida 1 %. O produto oriundo da reação é o NO_2^- , determinado por espectrofotometria a 540 nm através da formação de cor rósea que advém da reação entre o nitrito com a sulfanilamida que possui como produto um composto diazônio. Subsequentemente este é acoplado ao bicloridrato-N-(1-Naftil)-etilenodiamina. Cada amostra teve seu respectivo branco, utilizado para determinar a quantidade de NO_2^- presente no material antes do estímulo a reação. A curva de calibração do equipamento foi realizada com nitrito de sódio e a unidade adotada para expressar a taxa enzimática foi $\text{nmol NO}_2^- \text{ h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de MF (massa fresca).

4.7.2. Glutamina Sintetase

Foi adotada a metodologia descrita por Elliot (1953), com modificações. Inicialmente pesou-se 0,2 g de amostra e adicionaram-se 2 mL do tampão de extração o qual é constituído de TRIS-HCl (50 mM, pH 7,5), Mercaptoetanol 2 mM e EDTA 1 mM. O material foi homogeneizado e levado a centrifuga por 10 min a 10000 rpm. Em seguida pipetaram-se 300 μL do sobrenadante para tubos de ensaios adicionando 1,7 mL do tampão de reação, composto por 500 μL de TRIS-HCL (200 mM, pH 7,5), 200 μL de ATP (50 mM, pH 7,0), 500 μL de ácido glutâmico (500 mM, pH 7,5), 100 μL de MgSO_4 1 M, 300 μL de hidroxilamina 100 mM e 300 μL de Cisteína 100 mM. Posteriormente o material foi incubado em banho maria a 30 °C por 30 min. O bloqueio da reação foi realizado com adição de 2 mL de tampão FeCl_3 10 %, TCA 24 % e HCl 6 M. O resultante do processo foi novamente centrifugado a 5000 rpm por 5 min a temperatura ambiente e em seguida realizou-se a leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 540 nm. O resultado foi expresso em $\mu\text{mol } \delta\text{- glutamihidroxamato h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de MF ($\mu\text{mol GH h}^{-1} (\text{g MF})^{-1}$).

Cada amostra teve seu respectivo branco, utilizado para determinar a quantidade do produto da reação presente no material antes do estímulo a formação deste.

4.8. Acúmulo de nitrogênio na parte aérea

Uma semana antes da colheita dos experimentos foi realizada a avaliação biométrica, que consistiu na colheita de 2 m da linha central de cada parcela. A cana colhida foi então separada em folha seca (Fs), ponteiro (Pt) e colmo (Cm), sendo que as folhas do chão recém caídas constituíram o compartimento de Fs (Anexo A 5).

Após separação do material, os compartimentos foram pesados individualmente no campo (precisão = 0,02 kg) de modo a obter a massa fresca. Em seguida coletou-se uma subamostra de Fs, que foi levada ao laboratório.

Os Pts foram todos moídos no campo com trituradora de forragem e então realizada a coleta de uma subamostra do material recém triturado que foi encaminhada ao laboratório. O mesmo procedimento foi realizado para Cm, porém apenas quatro colmos coletados de cada parcela foram triturados. As subamostras foram mantidas hermeticamente fechadas em sacos plásticos. Ao chegar no laboratório as subamostras foram transferidas para sacos de papel, pesadas (precisão = 0,001 kg) e mantidas em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C até que o mesmo permaneça com massa constante. Após este procedimento o material foi novamente pesado para determinação da umidade e posteriormente moído em moinho tipo Willey. O processo de trituração e determinação do N nos compartimentos seguiu o mesmo procedimento descrito no item análises nutricionais. Para obtenção do acúmulo de N na parte aérea, multiplicou-se a massa seca dos compartimentos (kg ha^{-1}) pelo teor de nutriente (g kg^{-1}) nos respectivos compartimentos.

4.9. Produtividade e atributos tecnológicos

No experimento 1 a massa de colmos em cada parcela foi determinada pela colheita dos colmos das três linhas centrais e em 10 m de comprimento. Os colmos foram cortados rente ao solo, seguida da despalha e retirada do ponteiro, simulando a colheita mecanizada do canavial. A massa de colmos foi registrada em célula de carga (dinamômetro) instalada em uma garra acopalha à carregadora de cana (Anexo A 6). No experimento 2, devido à indisponibilidade de mão de obra, a produtividade foi estimada por meio de avaliação biométrica. Para aumentar a representatividade da biometria, foram realizadas 3 avaliações por parcela para estimar a produtividade de colmos. A biometria realizada no experimento 2 consistiu da colheita de 2 m das linhas centrais da parcela (linhas 2, 3 e 4), seguida da despalha e retirada do ponteiro. Em ambos experimentos a massa de colmos obtida nas parcelas foi extrapolada para obtenção da produtividade de colmos (massa fresca), em Mg ha^{-1} .

Para quantificação dos atributos tecnológicos, foram coletados 10 colmos seguidos no centro de cada parcela antes da colheita. Os colmos foram cortados rente ao solo, seguido da despalha e retirada do ponteiro. As amostras foram encaminhadas ao laboratório de análises tecnológicas de cada unidade agroindustrial e a metodologia adotada foi aquela descrita em Fernandes (2011). As análises incluíram determinação do pol, brix, fibra, pureza e ATR (açúcar total recuperável). Com os resultados de produtividade de colmos (Mg ha^{-1}) e teor de pol (%), foi calculada a produtividade de açúcar (TPH, em Mg ha^{-1}).

4.10. Análise Estatística

O programa R (R Core Team (2015)) foi utilizado em todas as análises estatísticas, sendo os parâmetros avaliados pela análise de variância (ANOVA). Quando o teste F não apresentou significância ($P > 0,10$) considerou a igualdade entre os resultados. Para parâmetros significativos ($P < 0,10$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,10$) ou modelos de regressão, sendo escolhido o de melhor ajuste aos dados e com sentido biológico.

5. RESULTADOS

5.1. Experimento 1

A adição de nitrogênio, mesmo com distintas fontes de fertilizantes não alterou significativamente o teor de N no tecido vegetal aos 120 d nas folhas diagnóstico (TVD), além disso este parâmetro não se correlacionou significativamente com a produtividade. O teor foliar de N variou de 17,6 a 18,9 g kg⁻¹ (Tabela 3), próximos ao intervalo de teores adequados que varia de 18 - 25 g kg⁻¹ (RAIJ; CANTARELLA, 1997).

Os teores dos demais nutrientes (Ca, Mg, S, P, K, Cu, Zn, Mn e Fe) no tecido vegetal também não foram influenciados pelas fontes dos fertilizantes nitrogenados e por isso não foram apresentados. Contudo a dose de N influenciou o teor no tecido vegetal de Mg, K, S e Fe de modo que na aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N ocorreu aumento de 0,3 g kg⁻¹, 0,5 g kg⁻¹, 0,8 g kg⁻¹ e 17 mg kg⁻¹ respectivamente. O teor de Mn no tecido vegetal foi influenciado pela dose de N aplicada, porém de maneira inversa aos nutrientes anteriormente mencionados, sendo a menor dose superior em 4,19 mg kg⁻¹. O Mn também foi encontrado em teores maiores no tratamento Controle, de modo que a média deste superou a média dos demais tratamentos em 11,3 mg kg⁻¹. Para o Mg os teores médios dos tratamentos foram maiores que o Controle em 0,2 g kg⁻¹. As correlações obtidas entre os nutrientes avaliados aos 120 d demonstram que o teor foliar de N nesta condição praticamente não teve interdependência com os demais elementos avaliados. Sendo as dependências mais fortes observadas entre os elementos Ca e Cu, S e K, S e Cu e K e Cu (Figura 2).

O índice SPAD e Pf (número de perfilhos) avaliados aos 120 d após a brotação não foram alteradas significativamente pelas fontes de fertilizantes nitrogenados (Tabela 4), assim como observado para o teor foliar de N. Entretanto, a dose de N influenciou positivamente os resultados, demonstrando que a adubação com 100 kg ha⁻¹ de N independentemente da fonte de fertilizante utilizada é responsável pelo aumento do número de perfilhos e também o índice de verde da planta (Figura 3). O número de perfilhos por metro foi distinto entre a média do Controle e a média dos demais tratamentos (Figura 3A).

Tabela 3. Teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Dose de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100	
	Teor foliar de N (g kg ⁻¹)		
U	18,4	18,1	18,3
NA	17,6	18,4	18,0
U530	18,1	18,3	18,2
U850	18,2	18,8	18,5
U1500	18,9	18,5	18,7
U2000	18,0	18,2	18,1
Média	18,2	18,4	18,3
Controle	-	-	18,3
<i>P</i> _{Fonte}		0,76	
<i>P</i> _{Dose}		0,57	
<i>P</i> _{Fonte*Dose}		0,80	
<i>P</i> _{Média*Controle}			1,0

Figura 2. Coeficiente de correlação de Pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais na folha diagnóstico determinadas aos 120 dias após adubação. *, **, *** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Tabela 4. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 120 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100	
	Perfilhos m ⁻¹			Índice SPAD		
U	13,7	14,7	14,2	41,5	41,9	41,7
NA	13,9	15,0	14,4	42,0	42,0	42,0
U530	14,0	14,4	14,2	41,3	42,0	41,7
U850	14,3	14,6	14,5	42,2	43,2	42,7
U1500	14,2	14,9	14,6	41,7	42,7	42,2
U2000	13,5	15,2	14,4	41,9	42,4	42,1
Média	14,0 b	14,8 a	14,4 A	41,7 b	42,3 a	42,0
Controle	-	-	12,7 B	-	-	42,0
P _{Fonte}	0,94			0,26		
P _{Dose}	< 0,01			0,02		
P _{Fonte*Dose}	0,63			0,79		
P _{Média*Controle}			<0,01			0,96

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

Figura 3. Box-Plot do número de perfilhos por metro (A) e índice SPAD (B) em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as médias das doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O x representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

O conteúdo de N avaliado de maneira compartimentalizada na planta no momento da colheita, através da biometria foi significativo para o fator dose para Cm e Fs. Os Cm apresentaram em média 12,2 kg ha⁻¹ de N e mais na dose de 100 kg ha⁻¹ de N, além disso apenas os tratamentos U530 (ureia com 530 mg kg⁻¹ de NBPT) e U1500 demonstraram não seguir essa tendência (Tabela 5). No compartimento Fs, também apresentado na tabela 5, o fator dose representou aumento médio de 4,1 kg ha⁻¹ de N acumulado, situação que apenas no tratamento NA (nitrato de amônio) e U1500 (ureia com 1500 mg kg⁻¹ de NBPT) não foi confirmada.

A avaliação do acúmulo de N nos Pt não foi influenciada pelos fatores estudados, mas nota-se que o tratamento U1500 na dose 50 kg ha⁻¹ de N demonstrou tendência a valores acumulados superiores aos demais tratamentos (Tabela 5). A soma dos três compartimentos (Cm, Fs e Pt) formou a variável N_{planta}, a qual representa o acúmulo de N pela parte aérea no final do ciclo. Esta variável foi significativamente alterada pelo fator dose de N, demonstrando acúmulo médio superior de 15,1 kg ha⁻¹ de N na dose de 100 kg ha⁻¹ de N aplicado independente da fonte utilizada.

A distribuição percentual de N em cada compartimento foi semelhante, independente da dose de N aplicada, evidenciando ligeira tendência de maior acúmulo nos Cm com as doses de N, o que pode ocorrer pela maior produtividade nestas condições (Figura 4, Tabela 6).

A produtividade não foi influenciada significativamente pelas fontes de fertilizantes utilizadas, entretanto para o fator dose houve diferença significativa. Enquanto a produtividade do tratamento Controle foi de 105,8 Mg ha⁻¹, a produtividade média de todos os demais tratamentos atingiu 115,7 Mg ha⁻¹, superando em 9,4 % (10 Mg ha⁻¹) as parcelas que não receberam adubação (Tabela 6). Ou seja, a área foi responsiva à adubação nitrogenada. Além disso, houve aumento de produtividade quando a dose de N aumentou de 50 para 100 kg ha⁻¹ de N, com ganho médio de 3,9 % (4,3 Mg ha⁻¹ de colmos). A Figura 5 representa o incremento em produtividade com o aumento das doses de N, indicando a resposta positiva à adição de N neste experimento. A Figura 6 demonstra o comportamento da TCH perante a adição de NBPT a ureia. Observa-se que não houve efeito significativo do aumento na concentração de NBPT na produtividade de colmos da cana-de-açúcar.

Tabela 5. Acúmulo de N nos colmos (Cm), ponteiros (Pt), folha secas (Fs) e total (Nplanta) em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100		50	100		50	100	
	Cm (kg ha ⁻¹)			Pt (kg ha ⁻¹)			Fs (kg ha ⁻¹)			Nplanta (kg ha ⁻¹)		
U	63,3	78,8	71,0	21,0	19,5	20,3	33,5	42,8	38,1	117,6	141,1	129,4
NA	65,7	78,2	71,9	20,8	23,1	21,9	34,2	32,9	33,5	120,7	134,1	127,4
U530	76,7	72,7	74,7	20,7	20,7	20,7	33,0	38,0	35,5	130,4	131,4	130,9
U850	60,8	101,3	81,1	21,0	22,5	21,8	35,9	40,7	38,3	117,7	164,5	141,1
U1500	72,1	73,9	73,0	27,5	19,9	23,7	33,9	30,5	32,2	133,5	124,3	128,9
U2000	81,8	88,7	85,3	22,1	20,5	21,3	31,3	41,5	36,4	135,3	150,7	143,0
Média	70,1 b	82,3 a	76,2	22,2	21,0	21,6	33,6 b	37,7 a	35,7	125,9 b	141,0 a	133,4
Controle	-	-	59,5	-	-	22,0	-	-	30,0	-	-	111,5
<i>P_{Fonte}</i>	0,65			0,89			0,47			0,71		
<i>P_{Dose}</i>	0,04			0,52			0,05			0,04		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,31			0,63			0,33			0,34		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,11			0,89			0,14			0,10

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

Figura 4. Distribuição do nitrogênio na planta em Cm (colmos), Pt (ponteiros) e Fs (folha seca) em valores proporcionais em função das doses de N. Os valores demonstrados foram obtidos com as médias do fator fonte dentro de dose de N

Tabela 6. Produtividade de colmos em função dos fatores fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Dose de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100	
	Produtividade (Mg ha ⁻¹)		
U	111,8	115,8	113,8
NA	107,9	118,1	113,0
U530	116,8	121,0	118,9
U850	114,4	118,4	116,4
U1500	113,6	116,0	114,8
U2000	116,6	117,9	117,2
Média	113,5 b	117,9 a	115,7 A
Controle	-	-	105,8 B
<i>P_{Fonte}</i>	0,67		
<i>P_{Dose}</i>	0,06		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,90		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,02

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

Figura 5. Box-Plot da produtividade de colmos (TCH) em função da quantidade de N aplicada. Letras maiúsculas diferem a média do Controle (0) para os demais tratamentos e letras minúsculas diferem a média entre as doses 50 e 100 Kg ha⁻¹ de N. O x representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Figura 6. Influência da adição NBPT a ureia na produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar colhida sem queima com diferentes doses de N. Linha tracejada representa a média

Os atributos tecnológicos avaliados na biometria apresentaram comportamento distinto frente os fatores experimentais a quais foram expostos. O ATR não foi influenciado pelos fatores em estudo, demonstrando que a adição de N nesta condição não seria importante para este parâmetro. Porém o mesmo não aconteceu para o TPH (Mg de açúcar produzida por hectare), em que houve influência positiva da adição de nitrogênio no sistema, uma vez que a dose de 100 kg ha⁻¹ de N promoveu incremento de 4,2 % (0,96 Mg ha⁻¹ de açúcar) em relação à dose de 50 kg ha⁻¹ N. Além disso, a média do tratamento controle foi inferior aos demais tratamentos em 9,4 % (1,9 Mg ha⁻¹ de açúcar) (Tabela 7), demonstrando a viabilidade da adubação nitrogenada no aumento da produtividade de açúcar.

A variável Fibra, assim como ocorreu para o ATR, não foi influenciada pelas fontes e doses de N. Todavia, houve diferença entre o Controle e os demais tratamentos, o qual apresentou 0,6 % a mais de fibra nos colmos (Tabela 7). Para o Brix (sólidos solúveis) houve diferença entre o Controle e os demais tratamentos,

sendo que estes obtiveram em média 0,45 % a mais de sólidos solúveis. Ou seja, as parcelas não adubadas apresentaram maior teor de fibra e menor brix que as parcelas adubadas com N.

Tabela 7. Atributos tecnológicos e produtividade de açúcar (TPH) da cana-de-açúcar em função de fontes e doses de N aplicadas no início da brotação. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100		50	100		50	100	
	ATR (kg Mg ⁻¹)			Fibra (%)			Brix (%)			TPH (Mg ha ⁻¹)		
U	163,5	164,6	164,0	11,0	10,6	10,8	18,3	18,5	18,4	21,4	22,2	21,8
NA	164,9	163,0	163,8	11,2	11,0	11,1	18,4	18,3	18,3	20,9	22,6	21,7
U530	160,9	166,4	163,7	10,8	10,6	10,7	18,3	18,7	18,5	21,9	23,5	22,7
U850	161,9	162,5	162,2	10,9	10,8	10,8	18,2	18,5	18,4	21,7	22,4	22,0
U1500	164,0	161,2	162,6	10,7	11,0	10,9	18,5	18,2	18,4	21,7	21,9	21,8
U2000	163,5	167,9	165,7	11,1	10,7	10,9	18,4	18,9	18,6	22,4	23,2	22,8
Média	163,1	164,3	163,7	10,9	10,8	10,8 <i>B</i>	18,3	18,5	18,4 <i>A</i>	21,7 <i>b</i>	22,6 <i>a</i>	22,1 <i>A</i>
Controle	-	-	161,4	-	-	11,4 <i>A</i>	-	-	18,0 <i>B</i>	-	-	20,2 <i>B</i>
<i>P_{Fonte}</i>	0,57			0,26			0,69			0,62		
<i>P_{Dose}</i>	0,30			0,10			0,14			0,04		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,25			0,37			0,33			0,93		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,26			< 0,01			0,04			0,02

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

5.2. Experimento 2

Aos 60 d após adubação, o teor de N no tecido vegetal foi de $17,7 \text{ g kg}^{-1}$ no Controle e de $19,2 \text{ g kg}^{-1}$ na média dos demais tratamentos (Tabela 8), diferença de $1,54 \text{ g kg}^{-1}$ entre eles. Além disso, houve aumento no teor foliar de N quando a dose de N aumentou de 50 para 100 kg ha^{-1} , com incremento de cerca de $0,5 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 8). Entretanto, os teores foliares de N não variaram em função das fontes de N aplicadas, de tal forma que somente as doses de N apresentaram efeito significativo neste parâmetro (Figura 7).

Os demais nutrientes avaliados aos 60 d obtiveram comportamentos particulares frente os fatores experimentais. Para o K, Cu e Mn houve diferenças significativas entre a média do Controle e a média dos demais tratamentos. Em ambos casos o Controle foi inferior em $2,45 \text{ g kg}^{-1}$, $0,67 \text{ mg kg}^{-1}$ e $24,21 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente para o K, Cu e Mn, sendo que este último apresentou ainda diferença para o fator dose. A adubação com 100 kg ha^{-1} de N justificou o aumento de $11,35 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn no tecido foliar quando comparado a adubação com 50 kg ha^{-1} de N. Além disso, elementos como Fe, B e Ni tiveram seus teores influenciados pela interação dos fatores fonte e dose. No caso do B a aplicação de 100 kg ha^{-1} de N utilizando U950 (ureia com 950 mg kg^{-1} de NBPT) promoveu aumento do teor foliar deste elemento quando comparado a aplicação apenas de U (ureia) ocorrendo o mesmo para a aplicação de NA (nitrato de amônio) e U950 na dose de 100 kg ha^{-1} de N comparado a dose de 50 kg ha^{-1} de N.

O Fe, elemento abundante nos solos brasileiros, apresentou diferença significativa entre a média do Controle e a média dos demais tratamentos, a qual foi $17,14 \text{ mg kg}^{-1}$ maior. Ademais, para o Fe foi identificado interação dos fatores, apresentando a fonte U na dose de 100 kg ha^{-1} de N superior em $20,85 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe no tecido vegetal que a dose de 50 kg ha^{-1} de N. O Ni, elemento dificilmente detectado nestas condições experimentais, também apresentou teores foliares dependentes da interação fonte e dose de N, fazendo-se a U1500 superior a U2000 na aplicação de 100 kg ha^{-1} de N. Já os resultados do tratamento U1500 demonstra maiores teores de Ni na folha TVD na dose de 100 kg ha^{-1} de N, resultado oposto para o tratamento U2000 que apresentou maiores teores na dose de N inferior.

Tabela 8. Teor de N na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam média de quatro repetições

Fontes de N	Dose de N (kg ha^{-1})		Média
	50	100	
	Teor foliar de N (g kg^{-1})		
U	18,8	19,2	19,0
NA	19,9	19,4	19,6
U530	18,9	19,9	19,3
U950	18,6	19,5	19,0
U1500	18,7	19,5	19,1
U2000	19,0	19,8	19,4
Média	19,0 b	19,5 a	19,2 A
Controle	-	-	17,7 B
P_{Fonte}	0,61		
P_{Dose}	0,03		
$P_{\text{Fonte}*Dose}$	0,48		
$P_{\text{Média}*Controle}$			< 0,01

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

As correlações entre os teores nutricionais obtidas com valores padronizados demonstram pequena interação entre o N e os demais nutrientes, observando-se que neste momento (60 d após adubação) a melhor correlação do N aconteceu com Mn (Figura 8). Os demais elementos essenciais que apresentaram maiores interações, aproximadamente de 0,6 foram Ca e S, Mg e S, P e K, P e Cu, K e Cu, e Cu e Fe.

Apenas o fator dose de N foi significativo para perfilhamento aos 60 dias após adubação (Tabela 9; Figura 9 A). Observa-se que a adição de 100 kg ha⁻¹ de N independente da fonte incrementou 3,2 perfilhos por metro em relação a adição de 50 kg ha⁻¹ de N (Tabela 9). O maior número de perfilhos pode resultar em ganho de produtividade, uma vez que um maior estande de plantas pode proporcionar maior chance de sobrevivência a intemperes climáticos.

Figura 7. Box-Plot do teor de N na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas diferem a média do Controle (0) para os demais tratamentos e letras minúsculas diferem a média entre as doses 50 e 100 Kg ha⁻¹ de N. O x representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Figura 8. Coeficiente de correlação de Pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais determinadas na folha diagnóstico aos 60 dias após adubação. *, **, *** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

O índice SPAD foi 50 no tratamento Controle e de 52,4 na média dos demais tratamentos (Tabela 9) na avaliação aos 60 d após adubação. Entretanto, não houve diferença para o índice SPAD entre as doses de 50 e 100 kg ha⁻¹ de N (Figura 9 B). Tal fato implica que a adubação independente da dose e da fonte utilizada para o suprimento de N é capaz de aumentar o índice de verde da planta, em relação ao Controle.

A atividade das enzimas glutamina sintetase (GS) e nitrato redutase (NR) determinadas aos 60 d após adubação apresentaram comportamentos distintos. A GS foi significativamente influenciada pelo fator dose, de maneira que o aumento deste resultou em incremento de 2,74 $\mu\text{mol } \delta\text{-glutamihidroxamato h}^{-1} \text{ g}^{-1}$ de MF (Figura 10 A); no entanto, a média dos tratamentos não diferiu da média do Controle. Por outro lado, a atividade da NR foi superior em 235,7 nmol NO₂⁻ h⁻¹ g⁻¹ de MF nos tratamentos adubados com N quando comparados ao controle (Figura 10 B).

Tabela 9. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 60 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100	
	Perfilhos m ⁻¹			Índice SPAD		
U	33,5	35,6	34,6	51,4	52,8	52,1
NA	32,2	35,6	33,9	53,0	53,2	53,1
U530	31,4	36,1	33,7	52,0	51,3	51,7
U950	31,2	34,6	32,9	51,1	52,9	52,0
U1500	30,6	31,9	31,2	51,8	52,6	52,2
U2000	30,5	34,9	32,7	52,8	53,7	53,3
Média	31,5 b	34,8 a	33,4	52,0	52,8	52,4 A
Controle	-	-	31,0	-	-	49,9 B
<i>P_{Fonte}</i>	0,21			0,45		
<i>P_{Dose}</i>	< 0,01			0,17		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,77			0,80		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,13			0,01

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

Figura 9. Box-Plot do número de perfilhos (A) e índice SPAD (B) avaliados aos 60 dias após a adubação em função da quantidade de N adicionada. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 Kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Figura 10. Box-Plot da atividade das enzimas Glutamina sintetase (GS, em A) e Nitrato redutase (NR, em B) aos 60 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha^{-1} de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Os resultados obtidos aos 120 d após adubação diferiram quando comparados aos obtidos aos 60 d após adubação. Para o teor foliar de N, as diferenças entre o Controle e os tratamentos adubados se mantiveram, assim como entre as doses de N, porém aos 120 d após adubação também houve efeito das fontes de N neste parâmetro (Tabela 10). A superioridade dos tratamentos contra o Controle identificada foi de 1,18 g kg^{-1} de N no tecido vegetal, enquanto a diferença entre as doses apresentou-se pelo valor de 0,82 g kg^{-1} de N (Figura 11 A). Em relação as fontes, o teor foliar de N nos tratamentos com NA foi cerca de 0,9 g kg^{-1} de N superior aos tratamentos com U e U1500 (Tabela 10; Figura 11 B).

O teor foliar de N apresentou grande variação, de 13,5 e 17,7 g kg^{-1} de N, sendo o limite inferior distante do considerado adequado por Raji e Cantarella (1997), mas próximos aos encontrados por Santos et al. (2013) considerando distintos métodos para obtenção da faixa normal. Para os demais elementos avaliados, observa-se que a fonte interferiu de maneira significativa nos teores foliares de S, P e Mn. Para os dois primeiros elementos a utilização da U2000 implicou em 0,47 e 0,45 g kg^{-1} de S e P no tecido vegetal a mais que U independente da dose de N aplicada.

O nutriente Mn também apresentou superioridade nos teores foliares para a fonte U2000 comparada a U. Porém, esta foi estatisticamente igual a U530, sendo em média inferiores em 17,8 mg kg^{-1} de Mn nas folhas TVD. Já Cu e Zn foram significativos para o fator dose, onde apresentaram 0,24 e 1,13 mg kg^{-1} de seus teores respectivamente a mais no tecido vegetal para a aplicação de 100 kg ha^{-1} de N. Os demais nutrientes avaliados (K, Mg, Ca, B e Fe) não foram influenciados pelos fatores estudados e o Ni, também analisado neste período teve seus valores desconsiderados, pois aproximadamente metade das amostras apresentaram valores abaixo do limite de detecção do aparelho usado em sua determinação.

Tabela 10. Teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Dose de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100	
	Teor foliar de N (g kg ⁻¹)		
U	15,3	16,1	15,7 B
NA	16,1	17,1	16,6 A
U530	15,8	16,4	16,1 AB
U950	15,4	16,7	16,1 AB
U1500	15,5	15,9	15,7 B
U2000	15,7	16,6	16,1 AB
Média	15,6 b	16,5 a	16,1 A
Controle	-	-	14,9 B
<i>P_{Fonte}</i>	0,08		
<i>P_{Dose}</i>	< 0,01		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,83		
<i>P_{Média*Controle}</i>			< 0,01

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal e letras maiúsculas representam a diferença na vertical obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico.

Figura 11. Box-Plot do teor de N na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação em função da quantidade adicionada (A) e fontes (B) de N. Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis Controle (0) e demais tratamentos e letras maiúsculas representam a diferença entre as fontes obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. O x representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N (A) e fonte de N (B)

As correlações nutricionais aos 120 d (Figura 12) de maneira geral apresentam valores superiores aos demonstrados aos 60 d (Figura 8), como pode ser visto para o N, entretanto apenas Ca e S, S e P, e P e Mn apresentaram valores superiores a 0,60 para o coeficiente de correlação de Pearson, valor ainda considerado baixo.

A adubação nitrogenada também influenciou o perfilhamento o e índice SPAD aos 120 d após adubação. Para perfilhamento, não houve diferença significativa entre Controle (19,6 perfilhos m⁻¹) e a média dos tratamentos com N (20,8 perfilhos m⁻¹) (Tabela 11). Por outro lado, houve aumento no perfilhamento à medida em que a dose de N aumentou de 50 para 100 kg ha⁻¹ N (Figura 13 A). Contudo, a utilização de diferentes fontes na adubação nitrogenada não demonstrou alteração significativa deste parâmetro.

Figura 12. Coeficiente de correlação de Pearson obtido com valores padronizados para as variáveis nutricionais determinadas na folha diagnóstico aos 120 dias após adubação. *, **, *** significativo a 10, 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste F

Tabela 11. Número de perfilhos (Pf) e índice SPAD avaliados aos 120 dias após adubação em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100	
	Perfilhos m ⁻¹			Índice SPAD		
U	19,8	21,7	20,8	38,8	40,0	39,4
NA	20,6	20,3	20,5	39,7	40,7	40,2
U530	19,3	20,8	20,0	38,7	41,0	39,8
U950	20,9	20,9	20,9	39,8	42,0	40,9
U1500	20,2	22,6	21,4	38,4	40,4	39,4
U2000	20,0	22,6	21,3	39,9	40,3	40,1
Média	20,1 b	21,5 a	20,8	39,2 b	40,7 a	40,0 A
Controle	-	-	19,6	-	-	38,1 B
<i>P_{Fonte}</i>	0,83			0,24		
<i>P_{Dose}</i>	0,04			< 0,01		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,68			0,70		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,29			0,01

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico.

Figura 13. Box-Plot do número de perfilhos (A) e índice SPAD (B) avaliados aos 120 dias após a adubação em função da quantidade de N adicionada. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Para o índice SPAD, por sua vez, houve diferença significativa entre o controle e as parcelas adubadas, assim como entre as doses de 50 e 100 kg ha⁻¹ N (Tabela 11). Enquanto o índice SPAD foi de 38,1 no controle, este aumentou para 40,0 na média dos demais tratamentos e de 39,2 na dose de 50 kg ha⁻¹ N para 40,7 na dose de 100 kg ha⁻¹ N (Figura 13 B).

As enzimas NR e GS, avaliadas aos 120 d após adubação obtiveram comportamentos distinto do período anterior (60 d). A NR não apresentou significância para nenhum fator em estudo, mas nota-se tendência de valores superiores aos demais para o tratamento NA, assim como também ocorre para comparação entre o Controle e demais tratamentos (Figura 14 B). Já para GS detectou-se significância entre o Controle e demais tratamentos, estando estes 2,97 µmol δ-glutamihidroxamato h⁻¹ g⁻¹ de MF acima e também significância para o fator dose (Figura 14 A). A interação encontrada para variável GS permite concluir que a utilização da fonte U530 promove aumento da atividade enzimática na dose de 50 kg ha⁻¹ de N e a utilização da fonte U1500 apresentou o mesmo comportamento.

Os atributos determinados na biometria permitiram a compartimentalização do N na planta, determinando o conteúdo de N no Cm, Fs, Pt e Nplanta, equivalendo este último a soma dos três compartimentos. Os Cm apresentaram distinção para acúmulo de N tanto para o fator dose como para fonte (Tabela 12), mas não apresentou distinção para interação deles, apresentando ainda diferença significativa entre o Controle e demais tratamentos.

A fonte NA diferiu da U2000 e U1500, possuindo em média 13,0 kg ha⁻¹ de N a mais no compartimento Cm, isto porque U2000 e U1500 não diferiram entre si. Além disso este compartimento demonstrou que a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N resulta em aumento no acúmulo de N na ordem de 11,0 kg ha⁻¹ de N nos Cm (Tabela 12). Enquanto isso, a variável Fs apresentou diferença apenas entre o Controle e demais tratamentos, permitindo inferir que a aplicação de N independente da dose e fonte promoveu aumento de 12,1 kg ha⁻¹ de N no compartimento Fs quando comparado a situação de não adubação (Controle).

No compartimento Pt apenas as interações das variações experimentais impostas foram significativas, evidenciando que a aplicação de U na dose 100 kg ha⁻¹ de N aumenta o acúmulo deste nutriente em 19,9 kg ha⁻¹ em relação a U na dose 50 kg ha⁻¹ de N. E a U2000 resulta em maior acúmulo na dose de 50 kg ha⁻¹ de N, com incremento de 17,5 kg ha⁻¹ de N nos ponteiros (Tabela 12). Avalia-se ainda que na dose de 100 kg ha⁻¹ de N a fonte U obteve em média 25,7 kg ha⁻¹ de N a mais acumulado nos ponteiros que as fontes NA e U2000 as quais foram estatisticamente iguais.

O resultado da soma dos compartimentos anteriormente mencionado, Nplanta, foi positivamente influenciado pela aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N, a qual acumulou 15,0 kg ha⁻¹ de N a mais que a dose 50 kg ha⁻¹ de N. Além disso, essa variável também demonstrou que a não aplicação de N promove efeito negativo no acúmulo de N, tendo 27,7 kg ha⁻¹ de N a menos no Controle comparado a situação de aplicação independente da fonte e dose de N (Tabela 12).

O N distribuído proporcionalmente nos compartimentos Cm, Fs e Pt, apresentou menor quantidade nas folhas secas comparando-se com a distribuição na dose 50 e 100 kg ha⁻¹ de N. Mas em todos os casos os Cm são os responsáveis pela maior porcentagem de N na planta, devido a maior massa deste compartimento. Observa-se na Figura 15 que a medida que a aplicação de N aumenta há maior similaridade entre distribuição de N acumulado na Fs e Pt. De forma geral, a distribuição do N nos compartimentos da planta diferiu entre os dois experimentos avaliados (Figura 15).

A produtividade de colmos foi de 110,5 Mg ha⁻¹ no tratamento Controle e de 121,5 Mg ha⁻¹ na média dos tratamentos adubados (Tabela 13). Apesar da diferença numérica entre os valores, representando diferença de 11 Mg ha⁻¹, não houve diferença significativa entre eles ($P < 0,17$). Além disso, também não houve diferença significativa entre as doses de 50 e 100 kg ha⁻¹ N, que resultaram em produtividades de 119,2 e 123,9 Mg ha⁻¹, respectivamente. De forma semelhante, também não houve diferença significativa entre as fontes de N (Tabela 13). Na Figura 16 observa-se que não houve efeito significativo para as concentrações de NBPT na produtividade de colmos para nenhuma das doses de N avaliadas.

Figura 14. Box-Plot da atividade das enzimas Glutamina sintetase (GS, em A) e Nitrato Redutase (NR, em B) aos 120 dias após adubação em função das doses de N. Letras maiúsculas representam a diferença entre 0 (Controle) e a média dos demais tratamentos e letras minúsculas representam a diferença entre as doses 50 e 100 kg ha⁻¹ de N pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. O * representa a média dos tratamentos em função da quantidade de N

Tabela 12. Acúmulo de N nos colmos (Cm), ponteiros (Pt), folha secas (Fs) e total (N planta) em função dos fatores fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100		50	100		50	100	
	Cm (kg ha ⁻¹)			Pt (kg ha ⁻¹)			Fs (kg ha ⁻¹)			Nplanta (kg ha ⁻¹)		
U	42,9	54,2	48,5 AB	23,9 Ab	43,8 Aa	33,9	23,9	29,4	26,6	90,6	127,4	109,0
NA	41,8	66,4	54,1 A	30,1 Aa	18,9 Ba	24,5	22,5	21,0	21,7	94,4	106,4	100,4
U530	45,2	49,1	47,1 AB	19,9 Aa	25,7 ABa	22,8	22,9	22,2	22,5	87,9	96,9	92,4
U950	38,7	55,2	47,0 AB	21,8 Aa	29,7 ABa	25,8	14,4	24,1	19,2	74,9	109,1	92,0
U1500	38,2	43,1	40,6 B	30,0 Aa	35,6 ABa	32,5	25,4	32,5	29,0	93,2	111,1	102,1
U2000	39,2	44,1	41,6 B	34,8 Aa	17,3 Bb	26,0	27,0	19,9	23,4	101,0	81,3	91,1
Média	41,0 b	52,0 a	46,5 A	26,7	28,5	27,6	22,7	24,8	23,8 A	90,3 b	105,4 a	97,8 A
Controle	-	-	36,5 B	-	-	22,0	-	-	11,7 B	-	-	70,1 B
<i>P_{Fonte}</i>	0,06			0,30			0,28			0,60		
<i>P_{Dose}</i>	< 0,01			0,58			0,39			0,03		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,17			0,02			0,40			0,21		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,04			0,35			0,01			0,03

Letras minúsculas representam a diferença estatística entre as variáveis na horizontal e letras maiúsculas representam a diferença na vertical obtida pelo teste Tukey a 10 % de probabilidade. A diferença entre a média dos tratamentos e a média do Controle, no teste Tukey a 10 % de probabilidade foi identificada por letra maiúscula em itálico

Figura 15. Distribuição do nitrogênio na planta em Cm (colmos), Pt (ponteiros) e Fs (folha seca) em função das doses de N. Os valores demonstrados foram obtidos com as médias do fator fonte dentro de dose de N

Tabela 13. Produtividade de colmos em função de fontes e doses de N. Resultados representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Dose de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100	
Produtividade (Mg ha ⁻¹)			
U	125,0	133,1	129,1
NA	117,2	134,5	125,9
U530	122,9	124,8	123,8
U850	111,9	123,4	117,6
U1500	111,7	117,8	111,7
U2000	126,7	115,7	121,2
Média	119,2	123,9	121,5
Controle	-	-	110,5
<i>P</i> _{Fonte}	0,27		
<i>P</i> _{Dose}	0,30		
<i>P</i> _{Fonte*Dose}	0,52		
<i>P</i> _{Média*Controle}			0,17

Figura 16. Influência da adição NBPT a ureia na produtividade da cana-de-açúcar colhida sem queima com diferentes doses de N. Linha tracejada representa a média

Os atributos tecnológicos, ATR, TPH, Fibra e Brix não foram influenciados significativamente pelos fatores fontes e doses de N, assim como também ocorreu para a interação destes (Tabela 14). Porém, para a variável TPH houve tendência para maior produção na dose de 100 kg ha⁻¹ de N, uma vez que foi matematicamente maior em 1,0 Mg ha⁻¹ de açúcar, ocorrendo algo similar para a comparação entre o Controle e demais tratamentos que matematicamente apresentaram diferença de 1,6 Mg ha⁻¹ de açúcar, sendo o Controle inferior.

Tabela 14. Atributos tecnológicos e produtividade de açúcar (TPH) em função das fontes e doses de N. Valores representam a média de quatro repetições

Fontes de N	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média	Doses de N (kg ha ⁻¹)		Média
	50	100		50	100		50	100		50	100	
	ATR (kg Mg ⁻¹)			Fibra (%)			Brix (%)			TPH (Mg ha ⁻¹)		
U	142,8	140,4	141,6	11,1	11,3	11,2	16,2	15,9	16,1	20,9	21,8	21,3
NA	141,1	145,1	143,1	11,7	11,7	11,7	16,0	16,3	16,2	19,4	23,0	21,2
U530	145,0	144,9	145,0	11,4	11,4	11,4	16,2	16,3	16,3	21,0	21,3	21,2
U850	139,9	145,8	142,8	11,4	11,5	11,4	15,9	16,4	16,2	18,3	21,1	19,7
U1500	141,0	145,9	143,4	11,4	11,1	11,2	16,1	16,4	16,3	18,5	19,1	18,8
U2000	145,4	145,2	145,2	11,3	11,2	11,2	16,4	16,4	16,4	21,6	19,6	20,6
Média	142,5	144,6	143,5	11,4	11,3	11,4	16,1	16,3	16,2	19,9	21,0	20,5
Controle	-	-	145,6	-	-	11,3	-	-	16,5	-	-	18,9
<i>P_{Fonte}</i>	0,67			0,47			0,81			0,34		
<i>P_{Dose}</i>	0,15			0,83			0,20			0,18		
<i>P_{Fonte*Dose}</i>	0,46			0,98			0,56			0,36		
<i>P_{Média*Controle}</i>			0,41			0,94			0,26			0,27

6. DISCUSSÃO

Apesar de ser bem aceito que a resposta de soqueiras de cana-crua à adubação nitrogenada seja mais consistente do que em cana-planta (FRANCO et al., 2011), diversos estudos têm observado elevada variabilidade na resposta à adubação nitrogenada de soqueiras de cana-crua (MARIANO, 2015; OTTO et al., 2016). Os resultados deste estudo enquadram-se nestas observações prévias, uma vez que houve variação na resposta de soqueiras ao N nos experimentos.

Os teores foliares de N encontrados no experimento 1 variaram de 17,6 a 18,8 g kg⁻¹ e no experimento 2 de 15,3 a 19,9 g kg⁻¹, considerando todos os períodos avaliados. Os teores observados no experimento 1 estão próximos à faixa de suficiência estabelecida por Raij e Cantarella (1997) e Malavolta et al (1997), indicando que nesta condição a cana-de-açúcar estava se desenvolvendo em situação de adequado suprimento de N. Por outro lado, no experimento 2 os teores foliares de N apresentaram-se em média próximos aos limites inferiores da faixa adequada de teores estabelecida por aqueles autores, indicando que a cana-de-açúcar estava sofrendo algum nível de restrição nutricional no experimento 2. Porém, Reis Jr e Monnterat (2002) encontraram teores médios de 15 g kg⁻¹ de N para lavouras de alta produtividade, indicando que nem sempre a diagnose foliar é uma ferramenta eficiente para diagnosticar situações de deficiência nutricional.

No experimento 1 a aplicação de N não foi capaz de influenciar o teor foliar deste elemento (Tabela 3). Este comportamento, apesar de inesperado, já foi relatado na literatura (VALE, 2009; CORREIA 2012; MEGDA, 2013). Por outro lado, no experimento 2 a adubação nitrogenada aumentou o teor foliar de N nas avaliações realizadas aos 60 e 120 d após adubação (Tabelas 8 e 10). A ausência de efeito no teor foliar de N no experimento 1 e efeito positivo observado no experimento 2 pode ser explicado pelo maior teor de MOS no experimento 1 (35 g dm⁻³ – Tabela 2) quando comparado ao experimento 2 (10 g dm⁻³ – Tabela 2), resultando em maior capacidade de suprimento de N às plantas por meio da mineralização da MOS (OTTO et al., 2013).

O índice SPAD foi influenciado significativamente pela dose de N em ambas áreas aos 120 d, com valores próximos a 40. Resultados semelhantes foram observados por Correia (2012). Ou seja, o índice SPAD foi útil para diagnosticar o efeito dos tratamentos nas plantas. Além de ser útil para predizer o *status* de N na planta, o índice SPAD também tem outras utilidades como identificação de estresse hídrico da cultura da cana-de-açúcar (GRUIMARÃES, 2011; SILVA et al., 2014).

No presente estudo o índice SPAD não foi capaz de diagnosticar diferenças entre as fontes de N como observado no estudo de Megda (2013). Por outro lado, tanto neste estudo quanto no de Megda (2013) houve redução do índice SPAD ao longo do tempo. No experimento 2, por exemplo, houve redução de 12 unidades do índice SPAD entre os tempos 60 e 120 d após adubação. Este fenômeno pode estar relacionado à diminuição do teor de N foliar ao longo do tempo (KOLLN, 2012), como também observado no experimento 2. Estes resultados indicam que a utilização do índice SPAD ou análise do teor foliar de N para diagnóstico nutricional de N deve ser realizado em estádios iniciais de desenvolvimento da cultura.

Em ambos experimentos houve aumento no perfilhamento com as doses de N, independentemente do período. Esta condição advém do estímulo causado pelo N na planta, a qual eleva a atividade dos meristemas na parte aérea, estimulando o perfilhamento da planta (MARSCHNER, 2012). Os valores encontrados para o número de perfilhos por metro estão de acordo com a literatura (CORREIA, 2012), variando no experimento 1 de 12 a

18 %, 27 % na dose de 50 kg ha⁻¹ N e 58 %, 15 % e 27 % na dose de 100 kg ha⁻¹ N. Para o experimento 2, a distribuição do N nos compartimentos da planta ocorreu de forma distinta do observado no experimento 1 (Figura 4 e 15). No experimento 2, a distribuição percentual de N nos Cm, Fs e Pt foi respectivamente de 37 %, 22 % e 12 % no tratamento Controle; 45 %, 30 % e 25 % na dose de 50 kg ha⁻¹ N; e 49 %, 27 % e 24 % na dose de 100 kg ha⁻¹ N respectivamente. Ou seja, a adubação nitrogenada parece ter influenciado a distribuição de N nos compartimentos da planta no experimento 2, porém não no experimento 1.

A influencia dos fatores estudados sobre o atributo produtividade no experimento 2 indicou que o fertilizante foi uma fonte menos expressiva no fornecimento de N às plantas no experimento 1. Isso era esperado, devido aos maiores teores de MOS e maior capacidade de suprimento de N as plantas (DOURADO-NETO et al., 2010; OTTO et al., 2013). Outro fator que pode ter afetado a distribuição do N nos compartimentos na planta do experimento 2 foram as possíveis perdas de N pela parte aérea dos vegetais por meio de emissão de amônia pelas folhas (FARQUHAR et al., 1980). Além disso, em situações de maior restrição de N no solo, é necessário que a mobilização interna do nutriente fique mais ativa, assim como ocorreu para Oliveira (2008) e Ferreira et al. (2016).

Megda (2013) obteve resultados próximos para o acúmulo de N, assim como maior acúmulo de N no Cm, seguido de Pt e Fs. Oliveira (2008) e Ferreira et al. (2016) também observaram acúmulo de N próximos aos valores obtidos neste estudo. O N total da planta variou de acordo com a dose de N aplicada no experimento 2 corroborando com Franco (2008); entretanto, no estudo de Franco (2008) o acúmulo de N na planta foi superior ao obtido no presente estudo, o que pode ser explicado pelas diferenças de manejo e variedades.

O acúmulo de N por megagrama de colmo produzido foi distinto entre as áreas experimentais. No experimento 2, os valores oscilaram de 0,63 a 0,96 kg Mg⁻¹ e no experimento 1 de 1,03 a 1,39 kg Mg⁻¹. Este resultado é explicado pelas maiores produtividades e menor conteúdo de N na planta obtida no experimento 2. No experimento 1 ocorreu maior absorção de N devido a mineralização da MOS resultando na absorção de luxo do nutriente, uma vez que as maiores quantidades absorvidas não foram convertidas em biomassa. Para ambos os ambientes, o controle demonstrou menores valores de N por megagrama de colmo, evidenciando que a simples avaliação entre biomassa e conteúdo de N não é suficiente para explicar esta relação, pois há efeito de diluição ou concentração deste índice. Os valores obtidos no presente estudo estão de acordo com a literatura, onde a aplicação de N promove aumento da quantidade deste nutriente por megagrama de colmo produzida (FRANCO, 2008; MEGDA 2013).

A exportação média do N por 100 megagrama de colmo produzido foi de 65,0 kg e 37,6 kg, no experimento 1 e 2 respectivamente, evidenciando que a planta translocou maiores quantidades de N para o colmo quando havia maior disponibilidade deste nutriente no sistema ou quando foi fornecido. A dose de 100 kg ha⁻¹ de N demonstrou absorção superior de 8,2 e 7,2 kg de N por 100 Mg de colmo produzido, no experimento 1 e 2, respectivamente. Franco (2008) demonstrou que o aumento da dose de N não foi capaz de influenciar a exportação deste nutriente. Porém, os resultados deste estudo são condizentes com o acúmulo de N por megagrama de colmo produzido, pois os maiores valores deste índice foram apresentados para a maior dose de N (100 kg ha⁻¹).

As variáveis ATR, TPH, fibra e brix não foram alteradas significativamente pelos tratamentos no experimento 2, de forma semelhante ao observado por Trivelin et al. (2002) e Correia (2012). Já para o experimento 1 a porcentagem de fibra foi superior no tratamento Controle, evidenciando que a adubação

nitrogenada reduziu a quantidade de fibra presente nos colmos. Entretanto a diferença foi pequena resultando em teor médio de fibra de 11 %, o que é considerado normal quando comparado com outros estudos que observaram teor de fibra variando de 9 a 20 % (FRANCO, 2008; SCAPARI, BEUCLAIR, 2008; CORREIA, 2012).

O aumento no teor de brix e diminuição no teor de fibra no experimento 1 proporcionado pela adubação nitrogenada difere dos resultados obtidos por Anjos et al. (2007) e Trivelin et al. (2002), em que à aplicação de N não interferiu nos valores apresentados. Além disso, a porcentagem de brix apresentou pequena diferença entre as áreas experimentais, no experimento 1 houve média 2 % a mais de brix, apresentando valores médios de 18 %, os quais são próximos ao encontrados por Dalchiavon et al. (2014) de 15 % e Correia (2012) de 20,5 % na condução de segunda soca.

O ATR no experimento 1 foi aproximadamente 163 kg Mg⁻¹ e no experimento 2 de 143 kg Mg⁻¹. Os maiores valores de ATR obtidos no experimento 1 são explicados pela época mais tardia de colheita do experimento 1 (setembro) em comparação ao experimento 2 (junho), favorecendo o acúmulo de sacarose nos colmos. Entretanto, não houve diferença de ATR entre os tratamentos em ambos experimentos, similar aos resultados de Correia (2012) que obtiveram ATR médio de 147 kg Mg⁻¹. Os valores de ATR observados no presente estudo estão dentro de uma faixa de normalidade de valores para cana-de-açúcar colhida no meio de safra, que variaram de 134 a 160 kg Mg⁻¹ em diversos estudos (GOMES, 2003; FRANCO, 2008; CORREIA, 2012; ALVES et al., 2014).

A produtividade de açúcar (TPH) foi influenciada no experimento 1 pela adição de N independente da fonte. Este efeito pode estar relacionado ao aumento de produtividade proporcionado pela adubação nitrogenada, uma vez que os efeitos da adubação nitrogenada nos parâmetros qualitativos da cana-de-açúcar foram pouco significativos. Existem casos isolados de que a adubação nitrogenada também favoreça a qualidade da cana-de-açúcar (FRANCO et al., 2011). Entretanto, é mais comum na literatura relatos de que o aumento na produtividade de açúcar ocorre devido ao efeito do N na produtividade de colmos e não na qualidade da cana-de-açúcar, como também observado por Otto (2007). Entretanto, no estudo de Otto (2007) a produtividade de açúcar foi inferior à obtida no presente estudo, o que pode ser explicado pela menor produtividade obtida naquele estudo.

De forma geral a adubação nitrogenada influenciou o crescimento da cana-de-açúcar nos estádios iniciais de desenvolvimento, conforme observado para teor foliar de N, perfilhamento e índice SPAD. Dessa forma, era esperado resposta à adubação nitrogenada na produtividade de colmos. Como esperado, houve resposta significativa à adubação nitrogenada no experimento 1 (Tabela 6). A produtividade do Controle foi de 105,8 Mg ha⁻¹, que foi estatisticamente inferior à produtividade média das parcelas adubadas (115,7 Mg ha⁻¹), representando um ganho de 9,4 % (10 Mg ha⁻¹). No experimento 1 também houve efeito das doses de N, com produtividade média de 113,5 e 117,8 Mg ha⁻¹ nos tratamentos com 50 e 100 kg ha⁻¹ N, respectivamente.

No experimento 1, Mira (2016) avaliou as perdas de amônia por volatilização dos mesmos tratamentos avaliados neste estudo. O autor observou que o aumento da concentração de NBPT reduziu as perdas de amônia do N ureia, que totalizaram 19, 12, 11, 8 e 8 % respectivamente para ureia e ureia estabilizada com 530, 850, 1.500 e 2.000 mg kg⁻¹ de NBPT; naquele estudo, as perdas de amônia por volatilização do nitrato de amônio foram praticamente nulas. Com base nestas evidências, era esperado que a produtividade de colmos fosse influenciada pelas fontes de N. Entretanto, diferentemente do esperado, no experimento 1 não foi

observada diferença significativa entre as fontes de N, indicando que para aquela situação qualquer fonte de N escolhida, em cada dose aplicada, resultaria em produtividade semelhante.

A ausência de resposta de produtividade as fontes de N, apesar da magnitude de perdas de amônia por volatilização, observadas *in situ*, pode ser explicada pelo fato de que o solo é a principal fonte de N para a cana-de-açúcar (DOURADO-NETO et al., 2010). No estudo de Franco et al. (2011), por exemplo, o solo foi responsável por fornecer 65 a 90 % do N acumulado no final do ciclo de soqueira. Em outras palavras, nem as perdas de amônia do N-ureia (que totalizaram 19 % do N aplicado) e nem as perdas evitadas pelo uso de NBPT foram responsáveis por alterar a produtividade de colmos. De forma semelhante, o N preservado pelo uso do NBPT pode não resultar em ganhos de produtividade das culturas uma vez que nem sempre o N é o fator limitante (SILVA et al., 2016).

No experimento 2, também era esperada resposta à adubação nitrogenada uma vez que os tratamentos influenciaram não somente o teor foliar de N, como o perfilhamento, o índice SPAD mas também a atividade de enzimas relacionadas à assimilação do N pela planta. Além disso, o solo do experimento 2 apresentou baixo teor de MOS resultando em menor capacidade de suprimento de N às plantas (OTTO et al., 2013). Diferentemente do esperado, não houve resposta em produtividade à adubação nitrogenada no experimento 2. Neste experimento, a produtividade do controle foi de 110,5 Mg ha⁻¹, que foi estatisticamente semelhante à média das parcelas adubadas, que foi de 121,5 Mg ha⁻¹ (Tabela 13). Apesar da diferença numérica ser de 11 Mg ha⁻¹, muito semelhante à observada no experimento 1 (10 Mg ha⁻¹), no experimento 2 a maior variabilidade dos resultados de produtividade pode ter limitado a obtenção de diferenças significativas (Figura 17).

A maior variabilidade dos dados é observada pelo coeficiente de variação experimental, o qual foi de 7,1 % e 12,5 % respectivamente para os experimentos 1 e 2, enquanto o desvio padrão foi de 8,14 e 15,15 nessa mesma ordem. A amplitude de resultados de produtividade variou de 96,3 a 134,2 Mg ha⁻¹ no experimento 1 e de 90,9 a 148,8 Mg ha⁻¹ no experimento 2 (Figura 17). A elevada variabilidade espacial no experimento 2 também limitou a obtenção de diferença estatística entre as doses de N, que resultaram em produtividades semelhantes de 119,2 e 123,9 Mg ha⁻¹ respectivamente para as doses de 50 e 100 kg ha⁻¹ N. Otto et al. (2016) observou que cerca de 24 % dos experimentos realizados em condições de cana-crua no Brasil não foram responsivos à adubação nitrogenada. Mariano (2016), por sua vez, observou ausência de resposta significativa ao N em cerca de 50 % dos experimentos avaliados. Estes estudos indicam que há grande variabilidade na resposta da cana-crua ao N, justificando os resultados obtidos no experimento 2.

Os resultados deste estudo podem indicar que em solos de textura mais argilosa há menor variabilidade espacial da produtividade da cana-de-açúcar o que pode resultar em maiores ganhos de produtividade proporcionados pela adubação nitrogenada. Em solos de textura mais arenosa e, portanto, menos tamponados, existe maior variabilidade espacial no desenvolvimento da cana-de-açúcar limitando o aumento de produtividade proporcionado pela adubação nitrogenada. Esse fato pode estar relacionado aos maiores teores de MOS, maiores teores de nutrientes e maior CTC dos solos de textura mais argilosos do que solos mais arenosos no Brasil, possibilitando desenvolvimento mais vigoroso das plantas nessas condições.

Mira (2016) também avaliou as perdas de amônia por volatilização dos tratamentos avaliados no experimento 2. Diferentemente do observado no experimento 1, o autor observou perdas de amônia muito baixas durante o período de avaliação, que totalizou menos de 2 % do N aplicado em todas as fontes. A ausência de perdas por volatilização foi resultado de um período sem chuva de 25 dias após a aplicações dos fertilizantes no

campo, inibindo a atividade da enzima urease (MIRA, 2016). Portanto, não eram esperadas diferenças de produtividade entre as fontes de N avaliadas no experimento 2. De fato, apesar da amplitude de produtividade observada entre as fontes de N no experimento 2 (variando de 111 a 129 Mg ha⁻¹, Tabela 13), não ocorreram diferenças significativas entre as fontes de N.

Apesar de Mira (2016) ter observado que o aumento na concentração de NBPT na ureia até 1.000 mg kg⁻¹ tem potencial de reduzir as perdas de amônia por volatilização em áreas de cana-crua, os resultados aqui apresentados não observaram ganhos de produtividade com a utilização de ureia estabilizada com NBPT quando comparados com a ureia. De fato, Silva et al. (2016) observaram que o aumento na concentração de NBPT na ureia tem potencial de reduzir as perdas por volatilização em diversas condições de solo. Por outro lado, naquele mesmo estudo o uso de NBPT em concentrações < 1.060 mg kg⁻¹ resultaram em ganhos de produtividade de diversas culturas da ordem de 5 % quando comparados à ureia; porém os ganhos diminuíram com doses de NBPT > 1.060 mg kg⁻¹. Tomando todos estes resultando em conjunto, apesar do aumento na concentração de NBPT ter potencial em melhorar a redução das perdas de amônia por volatilização da ureia, aparentemente doses menores de NBPT podem trazer ganhos semelhantes em termos de produtividade, pois nem sempre o N é o fator limitante, sendo o solo e não o fertilizante o principal fornecedor de N as plantas (DOURADO-NETO et al., 2010; FRANCO et al., 2011; OTTO et al., 2013).

Se por um lado os resultados deste estudo não indicaram incrementos de produtividade com o uso de ureia estabilizada com NBPT quando comparados à ureia, o fato do NBPT reduzir perdas por volatilização de amônia em condições de cana-crua (MIRA, 2016) é uma garantia de que em situações de déficit de N no sistema as perdas evitadas pelo uso do NBPT poderão resultar em benefícios à cultura. Além disso, este estudo abre um precedente que demonstra a viabilidade da utilização de fertilizantes à base de ureia em substituição ao nitrato de amônio para adubação sobre palhada de soqueira de cana-crua. Além da vantagem econômica e operacional da utilização de ureia, a ausência de diferença significativa de produtividade entre as fontes a base de ureia e o nitrato de amônio observadas neste estudo, o potencial de perdas de nitrato por lixiviação em áreas de cana-crua (GHIBERTO et al., 2015; PORTOCARRERO et al., 2014) e a preferência de absorção de amônio pela cana-de-açúcar em relação ao nitrato (ROBINSON et al., 2011) são fatores que podem viabilizar a adoção em larga escala de fertilizantes a base de ureia para adubação de cana-crua num futuro próximo.

Figura 17. Variabilidade da produtividade nas áreas experimentais em função da aplicação de fontes e doses de N

7. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que independente da fonte de N não há variação dos parâmetros produtivos da cultura, indicando que não é necessário aumentar a concentração de NBPT na ureia para adubação da cana-crua. Deste modo, tanto a ureia convencional quanto a ureia estabilizada podem ser utilizadas para adubação nitrogenada de soqueira de cana-de-açúcar como fontes opcionais ao nitrato de amônio mantendo a produtividade do sistema.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. DA S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2235-2243, 2008.
- ALVES, V.; MONTANARI, R.; CARVALHO, M. P.; CORREA, A. R.; ROQUE, C. G. Atributos tecnológicos, stand e produtividade da cana-planta correlacionados com aspectos da fertilidade do solo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v.1, p. 75-91, 2014.
- ANJOS, I. A.; ANDRADE, L. A. B.; GARCIA, J. C.; FIGUEIREDO, P. A. M.; CARVALHO, G. J. Efeitos da adubação orgânica e da época de colheita na qualidade da matéria-prima e nos rendimentos agrícola e de açúcar mascavo artesanal de duas cultivares de cana-de-açúcar (cana-planta). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.31, p. 59-63, 2007.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BARTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e nitrogênio nas folhas de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v.13, p. 158-167, 2001.
- ASSOSSIACÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico para o Setor de Fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2010. 178 p.
- ASSOSSIACÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. Disponível em : < http://anda.org.br/multimedia/capa_e_indice_do_ae_20130001.pdf >. Acesso em: 24 de julho de 2016.
- BARRETO, H.J.; WESTERMAN, R.L. Soil urease activity in winter wheat residue management systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 1455-1458, 1989.
- BARTH, G.; **Inibidores de uréase e de nitrificação na eficiência de uso de adubos nitrogenados**. 2009. 78 p. Tese (Doutorado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2008.
- BEEVERS, L.; SHRADER, L.E.; FLISCHER, D.; HAGEMAN, R.H. The role of light and nitrate in the induction of nitrate reductase in radish cotyledons and maize seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 40, p. 691-698, 1969.
- BREMNER J. M.; CHAI H. S. Evaluation of N-(n- butyl) phosphorothioic triamide for retardation of urea hydrolysis in soil. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, New York, v. 17, p. 337-351, 1986.
- CAMBRAIA, J.; PIMENTA, J. A.; ESTEVÃO, M. M.; SANT’ANNA, R. Aluminum effects on nitrate uptake and reduction in sorghum. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 12, n. 12, p. 1435–1445, 1989.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO SOBRE NITROGÊNIO E ENXOFRE NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2007, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPNI, 2007. p. 355-392.
- CANTARELLA, H. N. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.A.V.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.
- CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. Fertilizer concerns. In: Poppe, M. K.; CORTEZ, L. A. B. (Ed.). **Sustainability of Sugarcane Bioenergy**. Brasília: Center for Strategic Studies and Management (CGEE), 2012, p. 71-94.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra 2016/2017.**

Disponível em : <

http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_04_18_14_27_15_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_16.pdf >. Acesso em: 13 jul. 2016.

CONTIN, L.T.M. **Uréia tratada com o inibidor da urease NBPT na adubação de cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo.** 2007. 69 p. Dissertação (Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2007.

CORREIA, M. A. R. **Nitrogênio em soqueiras de cana-de-açúcar cultivada em sistemas conservacionista.** 2012. 85 p. Tese (Doutor em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2012.

COSTA, G.; LABROUSSE, P.; BODIN, C.; LHERNOULD, S.; CARLUÉ, M.; AUTHIER, M.; KRAUSZ, P. Effects of humic substances on the rooting and development of woody plant cuttings. **Acta Horticulture**, v. 779, p. 255–261, 2008.

CRUCHAGA, S.; LASA, B.; JAUREGUI, I.; GÓNZÁLEZ-MURUA, C.; APARICIO-TEJO, P.; ARIZ Inhibition of endogenous urease activity by NBPT application reveals differential N metabolism responses to ammonium or nitrate nutrition in pea plants : a physiological study. **Plant and Soil**, Crawley, v. 373, p. 813–827, 2013.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M.; PANOSSO, A.R. Produtividade da cana-de-açúcar: variabilidade linear e espacial entre componentes tecnológicos e da produção. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 390-400, 2014.

DONATO, V.M.T.S.; ANDRADE, A.G. de; SOUZA, E.S. de; FRANÇA, J.G.E. de; MACIEL, G.A. Atividade enzimática em variedades de cana-de-açúcar cultivadas in vitro sob diferentes níveis de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1087-1093, 2004.

DOURADO NETO D.; POWLSON, D.; BAKAR, R. A.B.U.; BACCHI, O. O. S.; BASANTA, M. V.; CONG P THI; KEERTHISINGHE, S.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S. M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M. S. A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L. C.; WANG, J. Y.; ZAGAL, E.; VAN KESSEL, C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 39–152, 2010.

ELLIOT, W.H. Isolation of glutamine synthetase and glutamotrasferase from green peas. **The Journal of Biological Chemistry**, San Francisco, v. 201, p. 661-672.

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

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas.** 2 ed. Londrina: Planta, 2006. 169 p.

ERNEST, J.W.; MASSEY, H.F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 24, p.87-90, 1960.

FARQUHAR, G. D.; FIRTH, P. M.; WETSELAAR, R.; WEIR, B. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: determination of the ammonia compensation point. **Plant Physiology**, Rockville, v. 66, p. 710-714, 1980.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana de açúcar.** 3 ed. Piracicaba: STAB, 2011. 416 p.

- FERNANDES, M.S. **Nutrição Mineral de Plantas**. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432 p.
- FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. T. Contribution of N green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**. Oxford, v. 8, p. 869-866, 2016.
- FRANCO, H.C.J.; **Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada de cana- planta**. 2008. 112 p. Tese (Doutorado em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2008.
- FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 2763–2770, 2008.
- FRANCO, H. C. J. ; OTTO, R. ; FARONI, C. E. ; VITTI, A. C. ; Oliveira, E.C.A ; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer in Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 29-41, 2011.
- FREIRE, F. J. **Sistema para cálculos do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. 2001. 126 p. Tese (Doutor em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in São Paulo state , **Brazil. Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 42, p. 189–198, 2012.
- GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347–352, 2009.
- GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of soil analysis: Physical Methods**. Madison: SSSA, 2002, p. 255-291.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer leaching in a oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.68, p. 86-93, 2011.
- GHIBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 31, p. 141–149, 2015.
- GIL, P. T.; FONTES, P. C. R.; CECON, P. R.; FERREIRA, F. A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 611-615, 2002.
- GOMES, J. F. F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. 2003. 65 p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.
- GUIMARÃES, T. G.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G.; ALVAREZ V., V. H. & MONNERAT, P. H. Teores de clorofila determinados por medidor portátil e sua relação com formas de nitrogênio em folhas de tomateiro cultivado em dois tipos de solo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, p.209-216, 1999.
- HIREL, B.; ANDRIEU, B.; VALADIER, M.H.; RENARDA, S.; QUILLERE, I.; CHELLEB, M.; POMMEL, B.; FOURNIER, C.; DROUET, J. L. Physiology of maize II: Identification of physiological markers representative of the nitrogen status of maize (Zea mays) leaves during grain filling. **Physiology Plant**, Leipzig, v.124, p. 178–188, 2005.

- HIREL, B.; GOUIS, J.; NEY, B. & GALLAIS, A. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.58, p. 2369-2387, 2007.
- HÖSTENSTEINER, S.; FELLER, U. Nitrogen metabolism and remobilization during senescence. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.53, p. 927-937, 2002.
- KIEHL, J.C. Distribuição e retenção da amônia no solo após a aplicação de ureia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p.75-80, 1989.
- KOELLIKER, J. K.; KISSEL, D. E. Chemical equilibria affecting ammonia volatilization. p. 37–52. In: BOCK, B. R.; Kissel, D. E. (ed.) **Ammonia volatilization from urea fertilizers**. Bull. Y206 National Fertilizer Development Center. Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, 1988.
- KÖLLN, O.T. **Interação entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de ^{13}C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar**. 2012. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2012.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G H.; MOTTA, S A. Volatilização de amônia na cultura de milho: I Efeito da irrigação e substituição parcial de uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 481-487, 1997a.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G H.; MOTTA, S A. Volatilização de amônia na cultura do milho: II Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 489-496, 1997b.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P C O.; KORNDORFER, G H.; PEREIRA, S. Balanço nitrogenado da adubação sólida e fluida de cobertura na cultura de milho em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 363-376, 2000.
- LARA CABEZAS, W. A. R.; COUTO, P. A. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 739–752, 2007.
- LEAL, M. R. L. V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 53, p. 11-19, 2013.
- LONGO, R. M.; JOSÉ DE MELO, W. Hidrólise da uréia em latossolos: Efeito da concentração de uréia, temperatura, pH, armazenamento e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 651–657, 2005.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.
- MARIANO, E. **Predição da necessidade de fertilizante nitrogenado pela cana-de- açúcar e reações do nitrogênio orgânico e mineral dissolvidos em palha e solo de canaviais**. 2015. 146 p. Tese (Doutor em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.
- MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3 ed. Australia: Academic Press, 2012. 651p.
- MEGDA, M. X. V. **Transformações do N derivado do fertilizante no solo e a eficiência de utilização pela cultura da cana-de-açúcar cultivada em solo coberto por palha**. 2013. 156 p. Tese (Doutora em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013.

- MIRA, A. B. **Increasing NBPT rates to reduce ammonia volatilization losses from urea applied over sugarcane straw**. 2016. 66 p. Dissertação (Mestre em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.
- OLIVEIRA, E.C.A. **Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.
- OLIVEIRA, J. A.; STAFANATO, J. B.; GOULART, R.S.; ZONTA, E.; LIMA, E.; MAZUR, N.; PEREIRA, C. G.; SOUZA, H. N.; COSTA. Volatilização de amônia proveniente de ureia compactada com enxofre e bentonita, em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.38, p. 1558-1564, 2014.
- OTTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. 2007, 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2007.
- OTTO, R. **Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada**. 2012. 117 p. Tese (Doutor em Ciência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.
- OTTO, R.; MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; TRIVELIN, P.C.O. Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 7, p. 893–904, 2013.
- OTTO, R. Palestra apresentada no **VII Simpósio Tecnologia de Produção de Cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/sh/qz6kijmq4czfvqr/AAD6n2xBxoCRIVDDou1tN-FCa/Rafael%20Otto.pdf?dl=0>>. Acesso em: 01 agos. 2015.
- OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? **Bioenergy Research**, New York, v. 0, p. 1-18, 2016.
- PORTOCARRERO, R. A.; ACRECHE, M. M. Nitrate leaching in an Argiudoll cultivated with sugarcane. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 16, p. 329-332, 2014.
- URQUIAGA, S.; MALAVOLTA, E. URÉIA: UM ADUBO ORGÂNICO DE POTENCIAL PARA A AGRICULTURA ORGÂNICA. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 19, n.2, p.333-339, 2002.
- RAIJ, B.van.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C., (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. cap. 2, p.189-203.
- RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 12 jan. 2016.
- REDINBAUGH, M. G.; CAMPBELL, W. H. Higher plant responses to environmental nitrate. *Physiologia Plantarum, Sweden* v.82, p.640-650, 1991.
- REIS JR, Q.A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 367-372, 2002.

- ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; SOPER, K. V. F.; GAMAGE, J. H. H.; PAUNGFOO-LONHIENNE, C.;RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. **PLoS One**, San Francisco, v. 6, p. e19045, 2011.
- SALSAC, L.; CHAILLOU, S; MOROT-GAUDRY, J.F.; LESAINT, C.; JOLIVET, E. Nitrate and ammonium nutrition in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Philadelphia, v.25, p.805-812, 1987.
- SCAPARI, M.S.; BEUCLAIR, E.G.F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, Fundação, 2008. cap. 2, p. 47-56.
- SILVA, M. A.; SANTOS, C. M.; VITORINO, H. S.; RHEIN. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 173-181, 2014.
- SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNEIR, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, p. 500-509, 2012.
- SILVA, A. G .B.; OTTO, R.; SEQUEIRA, C. H.; SERMARINI, R. A. Urease Inhibitor NBPT on Ammonia Volatilization and Crop Productivity: a Meta-analysis. **Agronomy Journal**, Madison, 2016 (no prelo).
- SANTOS, E. F.; DONHA, R. M. A.; ARAÚJO, C. M. M.; LAVRES JUNIOR, J. CAMACHO, M. A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos Chn, DRIS e CND e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1651-1658, 2013.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5 ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.
- TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 637- 646, 2002.
- TURNER, F.T.; JUND, M.F. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semidwarf rice. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p.926-928, 1991.
- VALE, D.W. **Efeito da aplicação de nitrogênio nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produção de cana-de-açúcar**. 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciência Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.
- VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. **Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar**. Piracicaba: POTAFÓS. 2002. 16 p.
- VITTI, G. C. TAVARES Jr, J. E.; LUZ, P. H. C.; FAVARIN, J. L.; COSTA, M.C.G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 663–671, 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**, Viçosa, v. 31, p. 491–498, 2007.
- YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? **Informações agrônômicas**, Piracicaba, n. 91, 2000. 16 p.

- WACLAWOSVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. **Plant Biotechnology Journal**, England, v. 8, p. 263-276, 2010.
- WATSON, C.J. **Urease activity and inhibition**: principles and practice. London: The International Fertilizer Society, 2000. 40 p.
- WATSON, C.J. Urease inhibitors. In: '**IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers**'. International Fertilizer Industry Association. Frankfurt, 2005. Available at: <www.fertilizer.org/ifa/>.

ANEXO A. Avaliações experimentais

Avaliações experimentais realizadas: 1. Contagem de número de perfilho realizada aos 60 dias após adubação; 2. Determinação do índice SPAD na folha diagnóstico; 3. Coleta de folhas diagnóstico para avaliação do estado nutricional da cana-de-açúcar; 4. Determinação de N pelo método Kjeldahl; 5. Avaliação biométrica realizada para determinar o acúmulo e compartimentalização de nitrogênio; 6. Quantificação da produtividade da cultura da cana-de-açúcar utilizando célula de carga