



A eficiência de uso do $\text{N-}^{15}\text{NO}_3^-$ e $\text{N-}^{15}\text{NH}_4^+$ pela cana-de-açúcar em condições de campo é semelhante ⁽¹⁾.

Beatriz Nastaro Boschiero⁽²⁾; Eduardo Mariano⁽³⁾; Rafael Otto⁽⁴⁾; Paulo Cesar Ocheuze Trivelin⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da FAPESP e Yara ASA International

⁽²⁾ Doutoranda em Solos e Nutrição de Plantas; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / Universidade de São Paulo; Piracicaba, São Paulo; E-mail: bnastaro@usp.br; ⁽³⁾ Doutor em Ciências; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / Universidade de São Paulo; ⁽⁴⁾ Professor Doutor; Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / Universidade de São Paulo; ⁽⁵⁾ Professor Doutor Associado III; Centro de Energia Nuclear na Agricultura / Universidade de São Paulo.

RESUMO: A forma com que o N é absorvido pelas raízes é de extrema importância no processo metabólico da planta. Recentemente o amônio foi apontado como fonte preferencial de N pela cana-de-açúcar. Assim, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar a eficiência de uso do N-nitrato e do N-amônio por soqueiras de cana-de-açúcar em condições de campo, no estado de SP. Foram instaladas microparcelsas de 2 m de comprimento, onde foi aplicada a fonte nitrato de amônio, na dose equivalente a 100 kg ha^{-1} , marcado isotopicamente (^{15}N) no nitrato ($\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$) e no amônio ($^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$), em soqueira de cana-de-açúcar. O experimento foi instalado em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. Foram avaliadas a recuperação do N-fertilizante e a produção de biomassa seca das plantas aos 88, 150 e 253 dias após a adubação (DAA). Na última avaliação (253 DAA) a planta foi separada em ponteiro, folha seca, colmos, raízes e rizoma. O tratamento envolvendo a aplicação de nitrato de amônio apresentou maior produção de biomassa seca da parte aérea nas 2 primeiras épocas avaliadas comparativamente ao controle. Nas três épocas avaliadas não houve diferença do N na planta proveniente do fertilizante e da recuperação do N-fertilizante oriundo do $\text{N-}^{15}\text{NO}_3^-$ e $\text{N-}^{15}\text{NH}_4^+$ pela cana-de-açúcar. Da mesma forma, não foram detectadas diferença nas perdas de N (N não recuperado) pela aplicação de amônio ou nitrato. Houve maior recuperação do N no solo (0-40 cm) quando a fonte aplicada foi o amônio.

Termos de indexação: *Saccharum* spp., nitrogênio mineral, isótopo estável.

INTRODUÇÃO

As principais formas de nitrogênio (N) mineral absorvidas pelas raízes das plantas são o ânion nitrato e o cátion amônio. O nitrato geralmente está presente em maior concentração (1-5 mM) que o amônio (20-200 μM) na solução de solos agricultáveis (Owen & Jones, 2001). Além disso, o nitrato também é mais móvel no solo que o amônio, estando assim mais disponíveis às plantas (Miller & Cramer, 2004). A forma com que o N é absorvido pelas raízes é de extrema importância, pois irá

influenciar diretamente nos processos metabólicos e fisiológicos das plantas (Britto & Kronzucker, 2013; Bloom, 2015).

O amônio foi apontado recentemente como fonte preferencial de N pela cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) cultivada na Austrália, como resultado de uma característica evolutiva herdada de seus ancestrais (Robinson et al. 2011). Segundo os autores acima, este fato pode discriminar a absorção de nitrato pela cana-de-açúcar nos primeiros meses de cultivo, gerando perdas consideráveis do N-nítrico por lixiviação e desnitrificação, causando desta forma, poluição ambiental e baixa eficiência de utilização do nutriente pela cultura.

Considerando que a eficiência na utilização do N pela planta considera os aspectos de absorção e metabolização deste elemento, nossa hipótese é a de que em condições de campo, a possível preferência de absorção por amônio pela cana-de-açúcar poderia ser quantificada através da técnica do traçador isotópico, utilizando o isótopo ^{15}N . Desta forma, o nosso objetivo foi o de quantificar a eficiência de uso do $\text{N-}^{15}\text{NO}_3^-$ e $\text{N-}^{15}\text{NH}_4^+$ por soqueiras de cana-de-açúcar, em condições de campo, analisando também as perdas que cada uma das formas de N geraria no sistema solo-planta após um ciclo de cultivo de soqueira.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em condições de campo, no município de Novo Horizonte, SP. O solo da área foi previamente classificado como LATOSSOLO VERMELHO AMARELO (Embrapa, 2013), apresentando textura média (200 g kg^{-1} de argila). A cultivar (híbrido interespecífico complexo) de cana-de-açúcar utilizada foi a CTC15, avaliada na quarta soqueira (safra 2013/2014). A cana-de-açúcar vem sendo cultivada nesta área a cerca de 15 anos e a colheita da área é mecanizada, sem despalha a fogo (cana-crua).

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de nitrato de amônio como fonte de N, na dose de 100 kg ha^{-1} , marcado isotopicamente (^{15}N) no ânion nitrato ($\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3 - 3,29 \%$ de átomos de ^{15}N) e no cátion



amônio ($^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ – 3,098 % de átomos de ^{15}N). Um tratamento controle (sem adição de N) foi incluído. Os tratamentos foram aplicados em microparcelas de 2 m de comprimento localizadas na região central das parcelas experimentais, constituídas de oito linhas de cana-de-açúcar, cada uma com 15 m de comprimento e espaçamento entre linhas de 1,5 m. Os fertilizantes foram aplicados sobre a palha, ao lado da linha da cultura (distante 25 cm do centro da linha da cana-de-açúcar), dois meses após a colheita da terceira soqueira.

Foram feitas coletas de material vegetal 88, 150 e 253 dias após a adubação (DAA) objetivando-se determinar o N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, em kg ha^{-1}) e a eficiência de uso ou recuperação do N-fertilizante pelas plantas (%R), segundo metodologia descrita por Trivelin et al., (1994). Nas coletas aos 88 e 150 DAA o NPPF e %R foram determinadas indiretamente, a partir da folha +3, conforme metodologia utilizada por Franco et al. (2011). Na colheita final, aos 253 DAA cada compartimento da planta foi coletado (colmo, ponteiro, folha seca e raiz), sendo o NPPF e %R calculados a partir de cada componente da cana-de-açúcar. Posteriormente essas amostras foram secas em estufas de circulação forçada de ar a 65°C e moídas em moinhos do tipo Wiley para determinação da abundância de ^{15}N (% de átomos de ^{15}N) em espectrômetro de massas (PDZ Europa 20-20, Cheshire, GBR) acoplado a um analisador automático de N (PDZ Europa ANCA GSL, Cheshire, GBR).

Para determinação da eficiência de uso do fertilizante nitrogenado é necessário conhecer o acúmulo de N pela planta, na época em que as coletas de folhas +3 foram feitas. Assim, na mesma época de coleta de folhas +3 foram feitas avaliações de biometria nas parcelas fertilizadas com nitrato de amônio. Todo material vegetal da parte aérea das plantas presente em 2 m de sulco foi coletado para estimativa da produção de massa fresca, umidade e massa seca. A partir do material vegetal seco em estufa (65°C) determinou-se o teor de N total.

A colheita final da parte aérea das plantas das microparcelas ocorreu aos 253 DAA. As amostras de folhas secas, ponteiros e colmos presentes em 3 metros de linha foram separadas manualmente, sendo 1 metro de linha na linha central e 2 metros de linha em posições contíguas nas linhas adjacentes às microparcelas. Nessas amostras determinou-se a massa de material vegetal natural. Em seguida todo o material vegetal foi triturado em picadora de forragem, homogeneizado e subamostrado. Cada subamostra foi seca em estufa (65°C) para determinação da umidade. O material foi seco e moído em moinho tipo Wiley e utilizado

para determinação de N total e de abundância de ^{15}N (% de átomos de ^{15}N). O tratamento controle também foi analisado por espectrometria de massas para determinação da concentração isotópica natural média de ^{15}N .

Com os valores de abundância em átomos % de ^{15}N e as quantidades de N acumuladas na parte aérea da cana-de-açúcar, realizaram-se os cálculos de NPPF (nitrogênio na planta proveniente do fertilizante), expressos em kg ha^{-1} . Os resultados foram obtidos por meio das equações apresentadas a seguir.

$$NPPF (\%) = \left[\frac{[a - b]}{(c - b)} \right] * 100 \quad (1)$$

$$NPPF_{LC} (\text{kg ha}^{-1}) = \left[\frac{NPPF_{LC} (\%)}{100} \right] * N_{total} \quad (2)$$

$$NPPF_{LA} (\text{kg ha}^{-1}) = 2 * \left[\frac{NPPF_{LA} (\%)}{100} \right] * N_{total} \quad (3)$$

$$NPPF \text{ Total } (\text{kg ha}^{-1}) \\ = NPPF_{LC} (\text{kg ha}^{-1}) + NPPF_{LA} (\text{kg ha}^{-1}) \quad (4)$$

$$\%R = \frac{NPPF \text{ Total}}{NF} * 100 \quad (5)$$

Onde: *NPPF* é o N na planta proveniente do fertilizante; *a* representa a abundância em átomos de ^{15}N na planta; *b* é a abundância natural em átomos de ^{15}N (0,366%); *c* representa a abundância em átomos de ^{15}N no fertilizante; *Ntotal* é o N total da parte aérea (kg ha^{-1}); *LA* e *LC*: indicam a linha adjacente e central com aplicação de ^{15}N -fertilizante, respectivamente; %R: porcentagem de recuperação do ^{15}N -fertilizante pela planta; e *NF* que é a dose de N-fertilizante utilizada (kg ha^{-1}).

Na colheita final, além da parte aérea, foi realizada amostragem do sistema radicular das microparcelas com ^{15}N e no tratamento controle. A avaliação da massa seca de raízes foi realizada segundo Otto et al. (2009). Também se procedeu a amostragem de solo na camada de 0-40 cm para determinação da recuperação do N-fertilizante nesse compartimento.

A análise estatística foi feita utilizando-se o teste t ($P \leq 0,05$) por meio do procedimento PROC TTEST do SAS. Os resultados de produção de fitomassa seca, NPPF, %R foram apresentados na forma de valores médios, seguidos do erro padrão da média.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas duas primeiras épocas avaliadas (88 e 150 DAA) houve maior produção de massa seca da parte aérea de cana-de-açúcar no tratamento com aplicação de N comparativamente ao controle ($P < 0,05$), enquanto que na avaliação final (253 DAA) a cultura passou a não responder à fertilização nitrogenada ($P > 0,05$) (Figura 1A). Devido ao longo



do ciclo de cultivo, as plantas possivelmente passaram a absorver mais N derivado da mineralização do nutriente no solo, o que favoreceu a produção de massa seca no tratamento controle. Essa hipótese é congruente com o menor valor de NPPF (em kg ha⁻¹) e %R encontrado na última época de avaliação (Figuras 1B e C). Os valores de NPPF (em kg ha⁻¹) e %R não diferiram, em nenhuma época avaliada, para a forma de N aplicada (N-¹⁵NO₃⁻ e N-¹⁵NH₄⁺) (Figuras 1B e C). À medida que os dias após a adubação aumentaram, menor foi a recuperação do ¹⁵N-fertilizante, uma vez que houve crescente contribuição do N do solo na nutrição mineral da planta.

Takahashi (1968) e Vitti et al. (2002) reportaram diferenças na recuperação pela cana-de-açúcar do N aplicado na forma de nitrato em relação à de amônio. Em ambos os casos houve maior recuperação do N-NO₃⁻ em relação ao N-NH₄⁺, o que os autores atribuíram à hipótese de que a microbiota do solo imobilizou preferencialmente o N-amoniaco, tornando-o conseqüentemente menos disponível às plantas, ao contrário do N-nitrato, mais abundantes devido à menor assimilação microbiana (Recous et al., 1992). A maior recuperação do N-NH₄⁺ encontrado no solo no presente trabalho (Figura 2) suporta essa hipótese, embora o N-nitrato possa ter sido deslocado para camadas mais profundas em relação à amostrada (0-40 cm), uma vez que esse ânion é extremamente móvel no solo.

O fornecimento de N-nitrato ou N-amônio ao solo não influenciou a eficiência de uso do N (%) em nenhum dos compartimentos vegetais aos 253 DAA ($P > 0,05$) (Figura 2). A recuperação do N-fertilizante pela parte aérea das plantas foi de 43,8 % e 42,7% para N fornecido como N-¹⁵NO₃⁻ ou N-¹⁵NH₄⁺ respectivamente. Devido ao dinâmico ciclo do N no solo, não é possível afirmar qual forma mineral do nutriente foi efetivamente absorvida pelas plantas. Contudo, é possível inferir que, independentemente dos processos que levam às transformações e perdas do N no solo, a planta aproveitou igualmente o N fornecido como nitrato ou como amônio.

O N não-recuperado no sistema solo-planta não diferiu quanto à forma de aplicação (N-nitrato ou N-amônio), embora seja sugerido que uma parte do N-NO₃⁻ possa ser encontrada em camadas mais profundas do solo (> 40 cm de profundidade). Dessa forma, o N-nitrato apresentou perdas no sistema solo-planta semelhantes ao N-amônio, mostrando-se uma fonte adequada de N para soqueiras de cana-de-açúcar, ao contrário do que tem sido reportado na Austrália (Robinson et al., 2011). A ocorrência de lençóis freáticos rasos e a ausência de cargas positivas (adsorção de ânions) nos solos australianos são prováveis razões para as diferenças nos resultados obtidos.

CONCLUSÕES

A eficiência de uso do N por soqueira cana-de-açúcar, devido à aplicação de N-nitrato e N-amônio foi semelhante aos 88, 150 e 253 DAA.

A maior recuperação do ¹⁵N-fertilizante no solo ocorreu quando o N foi aplicado como amônio.

A quantidade de N não recuperado no sistema solo-planta foi igual para o N marcado (¹⁵N) no N-nitrato e no N-amônio, indicando perdas semelhantes do N-mineral no agroecossistema.

AGRADECIMENTOS

A Yara ASA International pelo financiamento do projeto; a Usina São José da Estiva e ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) pelo apoio logístico e operacional; a FAPESP pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro e segundo autores e ao CNPq pela concessão de bolsa ao último autor.

REFERÊNCIAS

- BLOOM, A. J. The increasing importance of distinguishing among plant nitrogen sources. *Current Opinion in Plant Biology*, 25:10-16, 2015.
- BRITTO, V. T. & KRONZUCKER, H. J. Ecological significance and complexity of N-sources preference in plants. *Annals of Botany*, 112:957-963, 2013.
- EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- 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 under Brazilian field conditions. *Field Crops Research*, 121:29-41, 2011.
- MILLER, A. J. & CRAMER, M. D. Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant Soil*, 274:1-36, 2004.
- OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E. & VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:601-611, 2009.
- OWEN, A. G. & JONES, D. L. Competition for amino acids between wheat roots and rhizosphere microorganisms and the role of amino acids in plant N acquisition. *Soil Biology and Biochemistry*, 33:651-657, 2001.
- RECOUS, S.; MACHET, J. M. & MARY, B. The partitioning of fertilizer-N between soil and crop: comparison of ammonium nitrate applications. *Plant and Soil*, 44: 101-111, 1992.
- ROBINSON, N.; BRACKIN, R.; VINALL, K.; SOPER, F.; HOLST, J.; GAMAGE, H.; PAUNGFOO-LONHIENNE, C.; RENNENBERG, H.; LAKSHMANAN, P. & SCHMIDT, S. Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. *Plos One*, 6(4): e19045, 2011.
- TAKAHASHI, D. T. Fate of ammonium and nitrate fertilizer in lysimeter studies with ¹⁵N. *Hawaiian Planters Record*, 58: 1-11, 1968.
- VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; FORTI, J. A. Recuperação do nitrogênio (¹⁵N) do amônio e do nitrato aplicado ao solo pela cana-

de-açúcar. Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento. 2: 1524-1528, 2002.

TRIVELIN, P. C. O.; LARA CABEZAS, W. A. R.; VICTORIA, R. L. & REICHARDT, K. Evaluation of a ^{15}N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. Scientia Agricola, 51: 226-234, 1994.

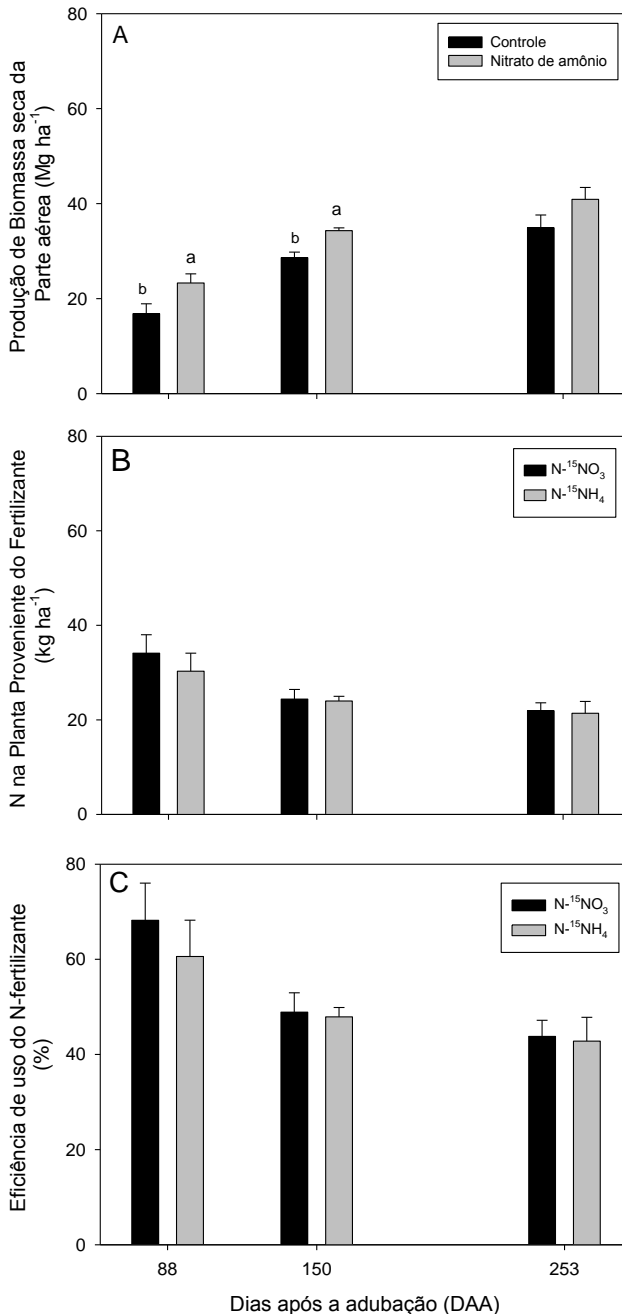
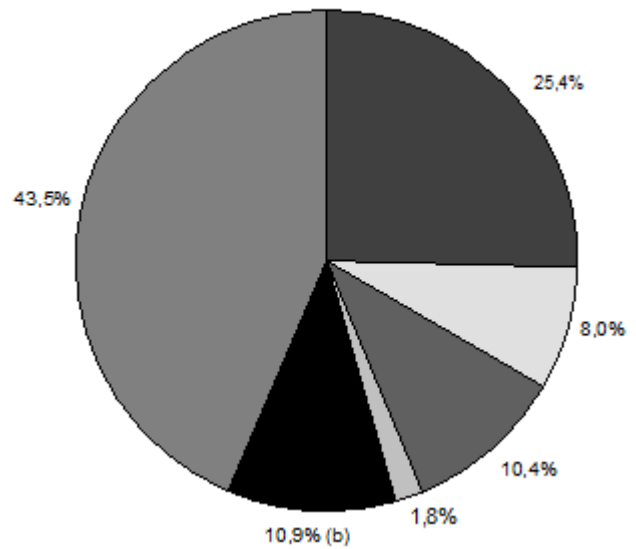


Figura 1 – Produção de biomassa seca da parte aérea (A), N na planta proveniente do fertilizante (B) e eficiência de uso do N-fertilizante, em porcentagem (C) aos 88, 150 e 253 dias após a adubação relacionada à aplicação de 100 kg ha⁻¹ N na forma de nitrato de amônio (com marcação em ^{15}N no N-nitrato e N-amônio).

A) % Recuperação N-¹⁵NO₃⁻



B) %Recuperação N-¹⁵NH₄⁺

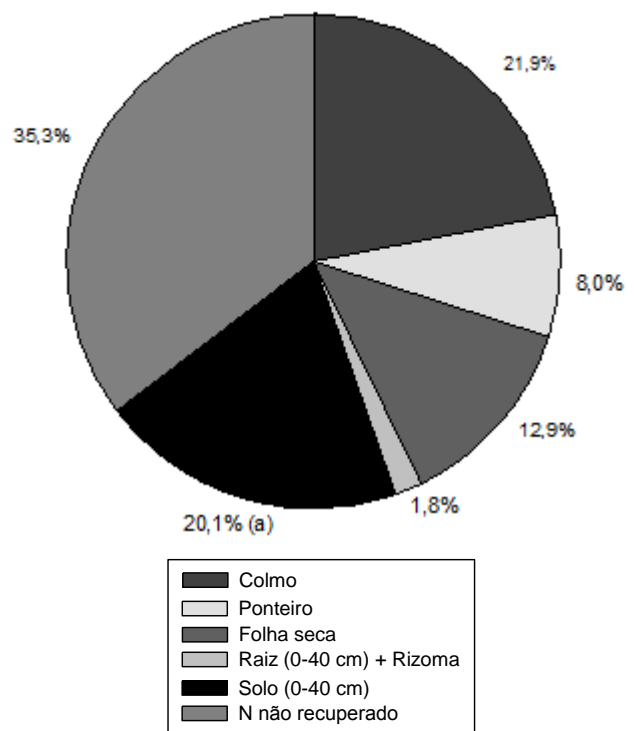


Figura 2 – Eficiência de uso ou porcentagem de recuperação do N-fertilizante derivado do N- $^{15}\text{NO}_3^-$ e N- $^{15}\text{NH}_4^+$ em diversos compartimentos do sistema solo-planta em cultivo de cana-de-açúcar em condições de campo, aos 253 dias após a aplicação do ^{15}N -fertilizante. Letras distintas localizadas após o valor percentual diferem-se entre si pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).