

APROVEITAMENTO PELA CANA-DE-AÇÚCAR DA ADUBAÇÃO NITROGENADA DE PLANTIO⁽¹⁾

Henrique Coutinho Junqueira Franco⁽²⁾, Paulo Cesar Ocheuze Trivelin⁽³⁾, Carlos Eduardo Faroni⁽⁴⁾, André Cesar Vitti⁽⁵⁾ & Rafael Otto⁽⁶⁾

RESUMO

O balanço de ¹⁵N de fontes nitrogenadas no sistema solo-planta tem sido de muita valia em estudos das transformações do N em diferentes agroecossistemas. No agrossistema da cana-de-açúcar, nas condições brasileiras, a resposta à adubação nitrogenada de cana-planta ainda é questão não totalmente esclarecida e a utilização de fertilizantes nitrogenados marcados com ¹⁵N pode auxiliar no entendimento dessa lacuna. Com o objetivo de avaliar o aproveitamento do N da uréia pela cana-de-açúcar no ciclo agrícola de cana-planta, realizaram-se dois experimentos em área comercial de cana-de-açúcar, com o cultivar SP81-3250. Esses experimentos foram feitos de fevereiro de 2005 a julho de 2006. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, sendo os tratamentos constituídos de três doses de N: 40, 80 e 120 kg ha⁻¹, na forma de uréia, e uma testemunha sem fertilização nitrogenada. No centro das parcelas com doses de N-uréia, foram instaladas microparcelas que receberam o fertilizante marcado com ¹⁵N. A recuperação de ¹⁵N-uréia pela cana-planta (planta toda) foi na média dos experimentos de 30, 30 e 21 %, respectivamente, para as doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N. A menor recuperação do N-uréia nas maiores doses, especialmente na de 120 kg ha⁻¹, deveu-se às perdas de N do sistema solo-planta. O aproveitamento do N da uréia (¹⁵N) representou em média 11,7 % do N total acumulado na planta toda. A distribuição do N proveniente do fertilizante nas diversas partes da planta não variou com a dose de N, sendo em média de 50 % nos colmos, 22 % nas folhas secas, 20 % nos ponteiros e 8 % nas raízes.

Termos de indexação: *Saccharum spp.*, uréia, ¹⁵N, cana-planta.

⁽¹⁾ Parte do projeto de doutorado do primeiro autor e parte do projeto Temático processo nº 02/10534-8 (FAPESP). Trabalho apresentado no XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007 (Gramado, RS)

⁽²⁾ Pós-Doutor, Bolsista FAPESP, Laboratório de Isótopos Estáveis, Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). Av. Centenário, 303, Caixa Postal 96, Piracicaba-SP, CEP 13400-970. E-mail: hjfranco@cena.usp.br

⁽³⁾ Professor Associado, Bolsista CNPq, Laboratório de Isótopos Estáveis, Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA-USP). E-mail: pcoolive@cena.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), Faz. Santo Antônio s/ nº, Bairro Santo Antônio, Caixa Postal 162, Piracicaba-SP, CEP 13400-970. E-mail: cfaroni@ctc.com.br

⁽⁵⁾ Pesquisador Científico, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Pólo Regional Centro Sul. Rodovia SP 127, km 30, Vila Fátima, Piracicaba-SP, CEP 13400-970. E-mail: acvitti@apta.sp.gov.br

⁽⁶⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ-USP). Bolsista FAPESP. Laboratório de Isótopos Estáveis, CENA/USP. E-mail: roto@esalq.usp.br

SUMMARY: UTILIZATION BY SUGAR CANE OF NITROGEN APPLIED AT PLANTING

The ^{15}N balance of N sources in the soil-plant system is of great value in studies of N transformation in different agroecosystems. In the sugarcane agroecosystem, the cane plant response to N fertilization for Brazilian conditions is not fully understood and the use of N fertilizer labeled with ^{15}N can help clarify this issue. To evaluate the urea-N utilization by sugarcane at plant cane harvest, two experiments were developed with the variety SP81-3250, in commercial sugarcane fields. The experiments were carried out from February 2005 to July 2006. The experiment was a randomized complete block design and the treatments three N-urea rates (40, 80 and 120 kg ha⁻¹) and a control without N-fertilization (0 kg ha⁻¹ N). In the center of the plots with urea application microplots were installed and treated with ^{15}N -labeled urea. The average recovery (%) of ^{15}N -fertilizer by sugarcane (whole plant) was 30, 30 and 21 %, respectively, at rates of 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ of N. The lower urea-N recovery at higher rates, mainly for 120 kg ha⁻¹ of N, was due to N losses from the soil-plant system. The N-urea recovery was on average 11.7 % of the total accumulated N in the whole plant. The different N rates on N from fertilizer did not influence N distribution in the different sugarcane plant parts, which were on average 50 % in the stalks, 22 % in the dry leaves, 20 % in the shoots and 8 % in the roots.

Index terms: Saccharum spp, urea, ^{15}N , plant cane.

INTRODUÇÃO

O N apresenta uma dinâmica complexa, pelas múltiplas transformações caracterizadas por sete estados de oxidação e por sua mobilidade no sistema solo-planta. Os fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo sofrem uma série de transformações químicas e microbianas, que podem resultar em perdas para os vegetais. Nesse contexto, considerando o custo dos adubos nitrogenados, é fundamental o desenvolvimento de manejos adequados da adubação nitrogenada que visem ao melhor aproveitamento do N pela cultura da cana-de-açúcar. Com isso, a realização do balanço de ^{15}N de fontes nitrogenadas tem sido de muita valia em estudos das transformações do N no sistema solo-cana-de-açúcar.

Trabalhos realizados com fertilizantes nitrogenados marcados com o isótopo ^{15}N evidenciaram ser variável o aproveitamento do ^{15}N -fertilizante pela cultura da cana-de-açúcar. Nas Ilhas Maurícios, Wong You Cheong et al. (1980) obtiveram recuperação na parte aérea da cana-de-açúcar de 21 a 48 %, com as fontes sulfato de amônio e nitrato de amônio, respectivamente, com influência do tipo de solo, das condições climáticas e da fonte nitrogenada. Ng Kee Kwong & Deville (1994) conseguiram aumentar a recuperação do ^{15}N -uréia (120 kg ha⁻¹) de 19 para cerca de 35 %, aplicando o adubo na água e irrigando por gotejamento, sem, contudo, conseguir elevar a produtividade. Em Taiwan, Weng et al. (1991) obtiveram as recuperações de 27, 23 e 19 %, respectivamente, para sulfato de amônio, nitrato de potássio e uréia; a

aplicação dos adubos no solo a 10 cm de profundidade, comparada à superficial, mostrou a maior recuperação. Na Austrália, Chapman et al. (1994) obtiveram recuperação de ^{15}N -uréia para a planta toda, em três sistemas de manejo com resíduos culturais no solo, de 18 e 33 %, para o adubo aplicado em superfície e em profundidade, respectivamente. No Brasil, Bittencourt et al. (1986), Sampaio et al. (1984), Gava et al. (2001) e Trivelin et al. (1995, 1996, 2002a,b) obtiveram recuperação de fertilizantes nitrogenados (sulfato de amônio, uréia e aquamônia) de 0,2 a 54 %.

Essas variações na recuperação do ^{15}N -fertilizante pela cultura de cana-de-açúcar podem estar associadas, ainda, ao efeito residual do fertilizante no solo, considerando sua elevada imobilização (Courtaillac et al., 1998) e as perdas do N no sistema solo-planta, tais como as perdas por desnitrificação (Trivelin et al., 2002a), lixiviação (Oliveira et al., 1999), volatilização de amônia (Trivelin et al., 2002a), bem como as perdas gasosas de N pela parte aérea das plantas (Holtan-Hartwing & Bockman, 1994).

No entanto, nas condições brasileiras, os resultados de recuperação do ^{15}N -fertilizante pela cana-de-açúcar, obtidos no ciclo de cana-planta em condições de campo, são incipientes. Portanto, é importante avaliar o aproveitamento do ^{15}N -fertilizante pela cana-planta em experimentos de campo, principalmente pelo fato de ser a adubação nitrogenada em cana-planta uma das questões ainda não esclarecidas no manejo dos canaviais e, com isso, a utilização de fertilizantes nitrogenados marcados com ^{15}N auxiliaria no entendimento dessa lacuna. E, ainda, com a futura

obrigatoriedade na colheita sem despalha a fogo, o balanço de ^{15}N , realizado nos compartimentos da planta: folhas secas, colmo, ponteiro e raízes, fornecerá informações mais exatas sobre a reciclagem do ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta desde a instalação do canavial (cana-planta).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o aproveitamento do ^{15}N -uréia e a distribuição do N em plantas de cana-de-açúcar (cana-planta) colhida sem queima.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em duas áreas comerciais de reforma do canavial. A primeira área é pertencente à Usina São Luiz (Pirassununga-SP), cujo solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. A análise de terra para fins de fertilidade foi realizada nas profundidades de 0-25 cm e 25-50 cm, antes da instalação do experimento, tendo a análise química apresentado: pH 5,5 e 4,7 em CaCl_2 ; 9 e 6 mg dm^{-3} de P (resina); K, Ca, Mg, H+Al, CTC, Al: 2,4 e 1,0 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 29 e 10 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 8 e 3 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 20 e 31 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 20 e 31 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ respectivamente; m igual a 2,5 e 18 % e V de 66 e 31 %. As principais operações no preparo do solo antes do plantio foram: gradeação pesada para matar a soqueira antiga; subsolagem para quebrar a compactação do solo; gradeação pesada para incorporação de corretivos (2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico e 2 Mg ha^{-1} de gesso agrícola) e gradeação média para preparo final do solo antes da sulcação. A instalação do experimento ocorreu entre 21 e 24 de fevereiro de 2005.

A segunda área foi instalada na Usina Santa Adélia (Jaboticabal-SP), em um Latossolo Vermelho-Escuro, apresentando as seguintes características químicas, respectivamente, nas profundidades de 0-25 cm e 25-50 cm: pH 5,1 e 4,2 em CaCl_2 ; 15 e 5 mg dm^{-3} de P (resina); K, Ca, Mg, H+Al, CTC, Al: 3,9 e 1,8 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 11 e 14 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 5 e 1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 28 e 34 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, 1 e 8 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, respectivamente; m igual a 4,8 e 54 % e V de 42 e 17 %. As principais operações efetuadas na reforma do canavial antes do plantio foram: dessecação da soqueira velha com aplicação de 4 L ha^{-1} de Roundup; aração profunda para incorporação ao solo dos resíduos vegetais e de 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico e gradeação para o preparo final do solo antes da sulcação e plantio. A instalação do experimento deu-se entre 4 e 8 de abril de 2005.

O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos foram três doses de N (40, 80 e 120 kg ha^{-1} na forma de uréia) aplicadas manualmente no fundo do sulco de plantio, mais uma testemunha sem aplicação de N. O fertilizante nitrogenado foi incorporado ao solo. As parcelas experimentais foram compostas por 48

linhas (sulcos) de 15 m espaçadas entre si por 1,5 m. No plantio, foram aplicados no fundo de sulco, em todas as parcelas, o cloreto de potássio e o superfosfato simples nas doses de 120 kg ha^{-1} , respectivamente, de K_2O e P_2O_5 . No interior de cada parcela, onde foi aplicado o fertilizante nitrogenado, instalou-se uma microparcela, com dimensão de 2 m de comprimento e 1,5 m de largura, totalizando 3 m^2 , que recebeu a uréia marcada com ^{15}N (5,04 % em átomos de ^{15}N). Os adubos foram cobertos manualmente com terra antes do plantio da cana-de-açúcar.

No plantio da cana-de-açúcar, cruzou-se o pé com a ponta das mudas (colmos), proporcionando uma distribuição de 17 a 20 gemas por metro linear de sulco. As mudas de cana depositadas no fundo do sulco foram cortadas em toletes com 2 a 3 gemas e feito o recobrimento com máquina. O cultivar de cana-de-açúcar plantado foi o SP81-3250.

A colheita final foi realizada entre 7 e 10 de junho e 11 a 13 de julho de 2006, respectivamente, nos experimentos das Usinas São Luiz e Santa Adélia. A colheita da parte aérea das plantas das microparcelas com ^{15}N -uréia e também na testemunha, sem adubação nitrogenada, foi realizada manualmente em 1 m de linha, no centro e em posições contíguas nas linhas adjacentes à microparcela, separando-se amostras de folhas secas, ponteiros e colmos. Nessas amostras, foi determinada a massa de material vegetal natural. Todo o material foi triturado em picadora mecânica de forragem. Depois da moagem e homogeneização de cada amostra úmida, retirou-se uma subamostra, que foi seca em estufa (65 °C), sendo determinada a umidade desse material. O material seco foi moído em moinho Willey e usado nas determinações de N-total e de abundância de ^{15}N (% em átomos de ^{15}N) no espectrômetro de massa ANCA/SL, modelo 20/20 da Europa Scientific, Krewé, U.K.

Após a colheita da parte aérea das plantas de cana-de-açúcar das microparcelas, foi realizada a amostragem de raízes, obtidas mediante o uso da sonda Bravifer (55 mm de diâmetro interno) no centro das microparcelas. Essa amostragem foi efetuada na profundidade de 0-60 cm, segundo Faroni & Trivelin (2006). As amostras de solo e raízes obtidas por sondagem nas microparcelas com ^{15}N -uréia foram embaladas em sacos plástico, identificadas adequadamente e transportadas ao CENA, onde foi feita a separação do solo das raízes por peneiramento e a seco (malha da peneira - 2 mm). As raízes e rizomas separados do solo foram lavados em água corrente, secos em estufa ventilada a 65 °C e obtidas as massas de material seco, em seguida realizou-se a moagem desse material em moinho tipo Willey. Essas amostras foram submetidas às determinações de N-total e de abundância de ^{15}N por espectrometria de massas.

A recuperação (RN) do ^{15}N -fertilizante na planta foi calculada por meio das equações:

$$\text{NPPF} = [(A - C)/(B - C)].\text{NT}$$

$$RN (\%) = (NPPF/NAF)100$$

significando: RN - recuperação percentual do ^{15}N -fertilizante na planta; NPPF - N na planta proveniente do ^{15}N -fertilizante; A - abundância de ^{15}N (% de átomos) da planta; B - abundância de ^{15}N (5,04 % de átomos) do N-fertilizante; C - abundância natural de ^{15}N (0,366 % de átomos); NT - conteúdo de N na planta (kg ha^{-1}); NAF - dose de N da fonte aplicada (kg ha^{-1}).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, utilizando o teste F a 90 % de confiança. Para comparar o efeito de doses de N, usou-se a análise de regressão polinomial.

O quadro 1 apresenta os valores de precipitação pluvial mensais ocorridos durante o período experimental.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A recuperação do ^{15}N -uréia (kg ha^{-1}), nas partes da planta no ensaio da Usina Santa Adélia (USA), foi significativamente maior nos tratamentos em que se empregaram as doses mais elevadas de N (Quadro 2), exceção feita ao ponteiro, em que não houve efeito significativo. Esse fato deveu-se a possíveis perdas de N pela parte aérea das plantas durante o processo de maturação fisiológica, haja vista que, além da recuperação do ^{15}N -uréia no ponteiro ter sido semelhante entre os tratamentos, o acúmulo de N, nessa parte da planta, foi menor nas doses de 80 e 120 kg ha^{-1} de N (Quadro 3).

Quadro 1. Precipitações pluviais mensais nas áreas experimentais nas Usinas Santa Adélia (USA) e São Luiz (USL)

Local	Precipitação pluvial mensal																		
	2005												2006						
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ag	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Total
	mm																		
USA	---	---	87	82	33	40	0,0	85	105	27	166	229	450	244	7,0	0,0	13	0,0	1568
USL	20	192	33	57	11	18	1,0	56	79	56	233	177	320	202	53	3,0	0,0	---	1511

Quadro 2. Recuperação do N-uréia (kg ha^{-1}) pela cana-de-açúcar na colheita nos experimentos das Usinas Santa Adélia e São Luiz

Doses de N	Colmo	Folha seca	Ponteiro	Parte aérea	Raiz	Planta toda
kg ha^{-1}						
Usina Santa Adélia						
40	6,1	3,2	2,2	11,5	0,8	12,3
80	9,7	5,9	3,1	18,7	1,3	20,0
120	13,5	6,7	3,2	23,4	1,5	24,9
Teste F	5,37*	2,37*	1,02 ^{NS}	5,22*	3,58**	5,74*
R ² - R.L.	0,99*	0,92**	NS	0,99*	0,95*	0,98*
R ² - R.Q.	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	32,7	40,5	40,5	29,5	35,0	28,0
Usina São Luiz						
40	6,1	2,0	2,7	10,8	1,4	12,2
80	14,5	3,9	7,4	25,8	2,2	28,0
120	12,0	5,4	5,5	22,9	2,5	25,4
Teste F	13,3*	11,5*	7,66**	25,51*	1,03 ^{NS}	28,14*
R ² - R.L.	0,46*	0,99*	NS	0,58*	NS	0,61*
R ² - R.Q.	0,99*	NS	0,99*	0,99*	NS	0,99*
C.V. (%)	21,9	27,2	32,7	15,9	56,6	14,7

^{NS}: não significativo; * e ** significativos, respectivamente, a 5 e 10 %.

Quadro 3. Acúmulo de nitrogênio nas partes das plantas de cana-de-açúcar na colheita da cultura nos experimentos das Usinas Santa Adélia e São Luiz

Doses de N	Colmo	Folha seca	Ponteiro	Parte aérea	Raiz	Planta toda
Usina Santa Adélia						
kg ha ⁻¹	N total, kg ha ⁻¹					
0	72,9	30,4	40,8	144,1	8,4	152,5
40	102,1	36,6	40,7	179,4	12,6	192,1
80	89,0	36,1	33,6	160,1	9,8	170,0
120	90,7	35,6	28,2	154,5	12,0	166,5
Teste F	1,93 ^{NS}	0,80 ^{NS}	3,19 ^{**}	1,54 ^{NS}	2,04 ^{NS}	1,64 ^{NS}
R ² – R.L.	NS	NS	0,90 [*]	NS	NS	NS
R ² – R.Q.	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	19,4	18,7	19,1	15,0	25,7	15,0
Usina São Luiz						
0	64,6	17,7	37,5	119,8	7,2	127,1
40	81,8	22,2	44,5	147,8	9,4	157,3
80	97,1	28,0	52,2	177,4	10,2	187,5
120	77,8	24,9	35,7	138,4	12,7	151,1
Teste F	2,99 ^{**}	3,18 ^{**}	3,33 ^{**}	5,01 [*]	1,83 ^{NS}	5,6 [*]
R ² – R.L.	NS	0,65 [*]	NS	NS	0,96 [*]	0,28 [*]
R ² – R.Q.	0,90 [*]	NS	0,82 [*]	0,86 [*]	NS	0,88 [*]
C.V. (%)	19,3	21,1	19,4	14,7	33,8	13,5

^{NS}: não-significativo; * e ** significativos, respectivamente, a 5 e 10 %.

Na senescência foliar, durante o período de maturação fisiológica, o aumento da fotorrespiração e da hidrólise de proteínas foi acompanhado pela redução nas atividades das enzimas glutamina sintetase (GS) e glutamato sintase (GOGAT), principais responsáveis pela assimilação da amônia (NH₃) no metabolismo do N nas plantas superiores. A redução na atividade dessas enzimas resultou no aumento da concentração de NH₄⁺ nas células das plantas (Mattsson et al., 1998). Como o NH₄⁺ em altas concentrações é tóxico para os vegetais (Holtan-Hartwing & Bockman, 1994; Mattsson et al., 1998), esta redução pode resultar em perdas naturais de NH₃ junto à corrente transpiratória.

Os resultados de recuperação (kg ha⁻¹) obtidos no ensaio da Usina São Luiz (USL) foram semelhantes aos observados na USA, ou seja, aumento na recuperação do ¹⁵N-uréia com o emprego de maiores doses de N (Quadro 2). No entanto, no ponteiro e no colmo, ocorreram reduções na recuperação do tratamento com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N. Os dados obtidos nessas partes da planta (ponteiro e colmo) contribuíram para menor recuperação do ¹⁵N-uréia na parte aérea e planta toda da cana-de-açúcar (Quadro 2).

Os decréscimos observados na recuperação do ¹⁵N-uréia no experimento da USL são corroborados pelos resultados de acúmulo de N (Quadro 3), tendo em vista

que na maior dose de N (120 kg ha⁻¹) obteve-se o menor acúmulo de N em relação ao da dose de 80 kg ha⁻¹ de N, em todas as partes da planta, excluindo-se as raízes, onde não houve diferença entre os tratamentos.

Os reduzidos valores de recuperação do ¹⁵N-uréia, nos dois experimentos, especialmente na maior dose, podem ter como causa as perdas de ¹⁵N-fertilizante durante o ciclo da cultura. Essas perdas podem ter ocorrido por lixiviação de NO₃⁻, desnitrificação, volatilização de amônia do fertilizante e por perdas naturais de N pela folhagem da cultura durante o processo de maturação.

As perdas de N por lixiviação podem ser desconsideradas, pois, na maioria dos ensaios com o emprego de ¹⁵N em cana-de-açúcar, constatou-se que essas perdas são pequenas. Bologna-Campbell (2007) não verificou perdas mensuráveis por lixiviação de N derivado do fertilizante (¹⁵N). O N total lixiviado médio correspondeu a 13,1 mg vaso⁻¹, equivalendo a 0,44 kg ha⁻¹ de N, sendo originado, provavelmente, do N nativo do solo. No trabalho de Ng Kee Kwong & Deville (1984), desenvolvido em lisímetros cultivados com cana-de-açúcar, não ocorreram perdas de N por lixiviação, mesmo em condições de elevada precipitação pluvial média anual, 1.300 e 3.200 mm, em duas regiões das Ilhas Maurício. O fato foi atribuído à

imobilização microbiana e ao movimento mais lento de NO_3^- em relação ao da água percolada. Oliveira et al. (1999) também não constataram perdas de N por lixiviação, utilizando a técnica do ^{15}N . Aliado a isso, na área da USA, Ghiberto et al. (2007) monitoraram o fluxo de água no solo no ciclo da cana-planta mediante a utilização de tensiômetros e extratores de solução do solo, constataram que a lixiviação de N foi de 15 kg ha^{-1} , porém, as perdas de ^{15}N proveniente do fertilizante foram desprezíveis, sendo de 21 g ha^{-1} .

Outra via de saída de N está ligada a perdas por desnitrificação do NO_3^- derivado do fertilizante, o que pode ter ocorrido, principalmente, no primeiro mês após a adubação (março) no experimento da USL, em decorrência de elevada precipitação pluvial (Quadro 1), aliada à incorporação ao solo de resíduos culturais do ciclo anterior e ao consumo de O_2 pelos microrganismos (quimiorranotróficos anaeróbios facultativos), o que possivelmente proporcionou condições de anaerobiose. No experimento da USA, acredita-se que este fenômeno não tenha ocorrido, pois as precipitações pluviais (Quadro 1) foram menos intensas nos primeiros meses após a adubação nitrogenada (abril e maio).

A volatilização de amônia após a hidrólise da uréia pode ser desconsiderada, tendo em vista o modo de aplicação do ^{15}N -uréia (no fundo do sulco de plantio seguido de incorporação ao solo). Segundo Trivelin et al. (2002a), quando a uréia é incorporada ao solo numa profundidade entre 15 e 25 cm, as perdas de NH_3 por volatilização são desprezíveis.

Portanto, a principal perda de N do sistema solo-planta pode ser atribuída à volatilização de amônia pela parte aérea das plantas, conforme discutido anteriormente. As perdas de N pela parte aérea de cana-de-açúcar foram estimadas, indiretamente, por Ng Kee Kwong & Deville (1984) e Trivelin (2002a), respectivamente, nas Ilhas Maurício e no Brasil, como sendo da ordem de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, de mesma grandeza das doses de N aplicadas nas fertilizações de canaviais.

Nos dois locais, a distribuição do N proveniente do fertilizante nas diversas partes da planta não variou com a dose de N. Na USL, essa distribuição foi a seguinte: 50 % nos colmos, 17 % nas folhas secas, 23 % nos ponteiros e 10 % nas raízes, aproximadamente (Quadro 2). Na USA (Quadro 2), a distribuição aproximou-se da anterior, sendo: 27 % do ^{15}N -fertilizante encontrado nas folhas secas, 16 % nos ponteiros, 6 % nas raízes e o restante nos colmos (51 %). Os resultados obtidos nas folhas secas indicam que a absorção do ^{15}N -uréia no ensaio da USA foi mais rápida do que na USL, independentemente de o fertilizante ter sido aplicado 45 dias após a aplicação feita na USL, sendo isso devido, possivelmente, a melhores condições de crescimento do sistema radicular da cana-planta no experimento da USA (melhor ambiente de produção). Trivelin et al. (2002b) e Bologna-Campbell (2007) constataram, no momento da colheita da cana-planta cultivada em lisímetros, que cerca de 40 % do ^{15}N -fertilizante absorvido pela cana-de-açúcar estava nas folhas secas, 22 % na parte subterrânea, 19 % nos colmos e 15 % nos ponteiros.

Segundo os autores, o maior acúmulo de N derivado do fertilizante nas folhas secas da planta de cana-de-açúcar foi devido à maior absorção do ^{15}N -fertilizante nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura.

Por outro lado, os resultados de distribuição do ^{15}N -uréia (Quadro 2) e do N acumulado na planta (Quadro 3) mostram o benefício da colheita sem despalha a fogo, tendo em vista que cerca de 20 % do N total e do ^{15}N -uréia na planta toda estavam contidos nas folhas secas, quantidades estas que seriam perdidas para atmosfera pela queima do canavial antes da colheita.

O N absorvido da uréia representou em média 11,1 e 12,3 % do acumulado na planta toda, respectivamente, na USA e USL. Sampaio et al. (1984) avaliaram que a contribuição do N da uréia para as doses de 20 e 60 kg ha^{-1} de N foi menos que 10 % do total acumulado na planta toda de cana-de-açúcar. Trivelin et al. (2002b) obtiveram um valor de 11,5 % para as doses de N de 30, 60 e 90 kg ha^{-1} aplicados na forma de uréia; Gava et al. (2001) verificaram que o N na planta proveniente do fertilizante representou de 10 a 16 % do N total acumulado na parte aérea da soqueira de cana-de-açúcar, enquanto Trivelin et al. (1995) obtiveram um valor menor que 15 % em cana-soca de fim de safra. No entanto, Bologna-Campbell (2007) constatou uma contribuição mais elevada, variando de 9,5 a 27,2 %, com resposta linear para as doses de N (40, 80 e 120 kg ha^{-1}), em todas as partes da planta.

Com base nos resultados da literatura e nos deste trabalho, pode-se afirmar que independentemente das condições experimentais, o N na planta proveniente do ^{15}N -fertilizante quantificado na colheita representa pequena fração do N total acumulado pela cultura de cana-de-açúcar. Como efeito, as principais fontes de N para a cultura de cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta devem ter sido a mineralização da matéria orgânica nativa do solo e de resíduos culturais (Ng Kee Kwong et al., 1987; Sampaio et al., 1995), e a fixação biológica do N_2 atmosférico por microrganismos (Urquiaga et al., 1992). Entretanto, não deve ser desconsiderada a hipótese de maior aproveitamento do ^{15}N -uréia durante o ciclo de crescimento da planta, considerando a ocorrência de perdas de N pela parte aérea, conforme mencionado anteriormente.

Em relação à recuperação percentual, os dados obtidos na USA não apresentaram diferenças significativas entre si dentro de cada compartimento de planta, exceção observada no ponteiro onde ocorreu redução na recuperação com o aumento da dose de N (Quadro 4). Já na USL, as reduções foram verificadas em todos os compartimentos, exceto nas raízes e ponteiros (Quadro 4). Sampaio et al. (1984) constataram a redução na percentagem de recuperação do ^{15}N -fertilizante com o aumento das doses de N, mesmo com o aumento nos valores absolutos de recuperação (kg ha^{-1}). Muitas vezes, a redução na recuperação percentual do ^{15}N -fertilizante com o aumento das doses é justificada pelas perdas do N aplicado no sistema solo-planta, conforme discutido anteriormente.

Quadro 4. Recuperação do N-uréia na colheita da cultura de cana-de-açúcar nos experimentos das Usinas Santa Adélia e São Luiz

Doses de N	Colmo	Folha seca	Ponteiro	Parte aérea	Raiz	Planta toda
kg ha ⁻¹	————— % —————					
Usina Santa Adélia						
40	15,2	8,1	5,4	28,8	1,9	30,6
80	12,1	7,3	3,9	23,4	1,6	25,0
120	11,3	5,6	2,7	19,5	1,3	20,8
Teste F	0,89 ^{NS}	1,33 ^{NS}	3,85 ^{**}	1,87 ^{NS}	1,19 ^{NS}	2,05 ^{NS}
R ² – R.L.	NS	NS	0,99 [*]	NS	NS	0,99 ^{**}
R ² – R.Q.	NS	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	34,4	31,6	35,0	28,6	35,5	27,1
Usina São Luiz						
40	15,2	4,9	6,8	26,9	3,4	30,3
80	18,2	4,8	9,3	32,2	2,7	35,0
120	10,0	4,5	4,6	19,1	2,1	21,1
Teste F	6,90 [*]	0,16 ^{NS}	6,34 [*]	13,47 [*]	0,95 ^{NS}	13,43 [*]
R ² – R.L.	0,39 [*]	NS	NS	0,35 [*]	NS	0,43 [*]
R ² – R.Q.	0,99 [*]	NS	0,99 [*]	0,99 [*]	NS	0,99 [*]
C.V. (%)	21,9	22,9	27,0	13,9	50,7	13,3

^{NS}: não-significativo; * e ** significativos, respectivamente, a 5 e 10 %.

A recuperação (%) de ¹⁵N-uréia pela cana-planta (planta toda) na média dos experimentos foi de 30, 30 e 21 %, respectivamente, para as doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N (Quadro 4). Esses valores de recuperação estão de acordo com os resultados da literatura para condições de campo, cerca de 10 a 50 % (Wong You Cheong et al., 1980; Sampaio et al., 1984; Weng et al., 1991; Chapman et al., 1994; Trivelin et al., 1995, 1996; Gava et al., 2001).

CONCLUSÕES

1. A recuperação do ¹⁵N-uréia pela cana-planta (planta toda) na média dos experimentos foi de 30, 30 e 21 %, respectivamente, para as doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N.
2. O N absorvido da uréia representou em média 11,7 % do N total acumulado na planta toda.
3. A distribuição do N proveniente do fertilizante nas diversas partes da planta não variou com a dose de N empregada, sendo, em média, de: 50 % nos colmos, 22 % nas folhas secas, 20 % nos ponteiros e 8 % nas raízes.

LITERATURA CITADA

- BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F. & SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). STAB - Açúcar, Álcool Subpr., 5:26-33, 1986.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007. 112p. (Tese de Doutorado)
- CHAPMAN, L.S.; HAYSOM, M.B.C. & SAFFIGNA, P.G. The recovery of ¹⁵N from labelled urea fertilizer in crop components of sugarcane and in soil profiles. Austr. J. Agric. Res., 45:1577-1585, 1994.
- COURTAILLAC, N.; BARAN, R.; OLIVER, R.; CASABIANCA, H. & GANRY, F. Efficiency of nitrogen fertilizer in sugarcane-vertical system in Guadeloupe according to growth and ratoon age of the cane. Nutr.Cycling Agroecosyst., 52:9-17, 1998.
- FARONI, C.E. & TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. Pesq. Agropec. Bras., 41:1007-1013, 2006.
- GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W. & PENATTI, C.P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. Pesq. Agropec. Bras., 36:1347-1354, 2001.

- GHIRBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S. & TRIVELIN, P.C.O. Lixiviação de nitrogênio em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., Gramado, 2007. Anais. Gramado, 2007. CD-ROM.
- HOLTAN-HARTWIG, L. & BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. *Norwegian J. Agric. Sci.* 14S:1-41, 1994. (Supplement)
- MATTSSON, M.; HUSTED, S. & SCHJOERRING, J.K. Influence of nutrition and metabolism on ammonia volatilization in plants. *Nutr. Cycling Agroecosyst.*, 51:35-40, 1998.
- NG KEE KWONG, K.F. & DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indian Ocean. *J. Environ. Quality*, 13:471-474, 1984.
- NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P.C. & RIVIERE, V. Value of cane trash in nitrogen nutrition of sugarcane. *Plant Soil*, 102:79-83, 1987.
- NG KEE KWONG, K.F. & DEVILLE, J. Application of ¹⁵N-labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius. *Fert. Res.*, 39:223-228, 1994.
- OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; VITTI, A.C. Lixiviação de nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar: experimento em lisímetro. *STAB - Açúcar, Álcool Subpr.*, 18:28-31, 1999.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H. & BETTAMY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia-¹⁵N em aplicação única ou parcelada. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:943-949, 1984.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; SILVA, V.M. & ALVES, G.D. Capacidade de suprimento de nitrogênio e resposta à fertilização de vinte solos de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:269-279, 1995.
- TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. & RODRIQUES, J.C. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesq. Agropec. Bras.*, 30:1375-1385, 1995.
- TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. & RODRIQUES, J.C. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e uréia-¹⁵N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31:89-99, 1996.
- TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C. & BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:193-201, 2002a.
- 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. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:193-201, 2002b.
- URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S. & BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:105-114, 1992.
- WENG, T.; CHAN, Y. & LI, S. Effects of various forms of nitrogen fertilizers and application methods on sugarcane yield and nitrogen uptake. *Taiwan Sugar*, 38:22-24, 1991.
- WONG YOU CHEONG, Y.; NG KEE KWONG, K.F. & CAVALOT, P.C. Comparative study of ammonium and nitrate fertilizers in two soils of Mauritius cropped with sugar-cane. In: RESEARCH COORDINATION MEETING IN SOIL NITROGEN AS FERTILIZER OR POLLUTANT, 1978. Proceedings. Vienna, IAEA, 1980. p.351-367.