

PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À LOCALIZAÇÃO DE ADUBOS NITROGENADOS APLICADOS SOBRE OS RESÍDUOS CULTURAIS EM CANAVIAL SEM QUEIMA⁽¹⁾

André Cesar Vitti⁽²⁾, Paulo Cesar Ocheuze Trivelin⁽³⁾, Glauber José de Castro Gava⁽⁴⁾, Henrique Coutinho Junqueira Franco⁽⁵⁾, Isabela Rodrigues Bologna⁽⁵⁾ & Carlos Eduardo Faroni⁽⁵⁾

RESUMO

O conhecimento agrônômico a respeito do manejo adequado de canaviais sem queima da palha, ainda é limitado, principalmente, no que se refere à adubação nitrogenada. O experimento foi desenvolvido em campo, com o objetivo de avaliar a produtividade e o balanço de ¹⁵N-fertilizantes no sistema solo-planta-palha e a perda de NH₃ por volatilização, em soqueira colhida mecanicamente sem queima, comparando-se a localização de fontes nitrogenadas aplicadas em superfície. O cultivar de cana-de-açúcar foi o SP81-3250. O delineamento experimental foi o de blocos completos inteiramente casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos constaram de quatro fontes de N: nitrato de amônio (NA), sulfato de amônio (SA), uréia (U) e uran (UA), na dose de 70 kg ha⁻¹ de N, com aplicação sobre a palha em área total ou em faixa, dos dois lados da linha da soqueira. Nas parcelas que receberam SA e U foram instaladas microparcelas, com os fertilizantes marcados em ¹⁵N. As fontes nitrogenadas U e UA, que contêm N na forma amídica, apresentaram as maiores perdas de amônia por volatilização, especialmente quando aplicadas em faixa. As perdas de N por volatilização causaram redução na produtividade da cana-de-açúcar, porém a localização dos fertilizantes nitrogenados não influenciou a produtividade de cana. Independentemente da

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo – CENA/USP. Trabalho financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP e pelo Centro de Tecnologia – COPERSUCAR. Recebido para publicação em fevereiro de 2006 e aprovado em fevereiro de 2007.

⁽²⁾ Pós-Doutorando, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo – CENA/USP. Laboratório de Isótopos Estáveis. Caixa Postal 96, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). Bolsista CNPq. E-mails: acvitti@cena.usp.br; pcotrive@cena.usp.br

⁽³⁾ Professor Associado, CENA/USP. Bolsista CNPq. E-mail: pcotrive@cena.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador Científico, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, Pólo Regional de Desenvolvimento do Centro Oeste Paulista. CEP 17201-970 Jaú (SP). E-mail: ggava@aptaregional.sp.gov.br

⁽⁵⁾ Doutorandos em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mails: hjfranco@cena.usp.br; cfaroni@cena.usp.br; irbologn@esalq.usp.br

localização das fontes nitrogenadas, a recuperação do ^{15}N pela cana-de-açúcar da fonte SA foi o dobro em relação à da U. A recuperação no sistema solo-planta-palha para SA e U foi de 74 e 55 %, respectivamente.

Termos de indexação: *Saccharum* spp., uréia, uran, sulfato de amônio, nitrato de amônio, ^{15}N , técnica isotópica.

SUMMARY: *SUGAR CANE YIELD AS RELATED TO THE LOCATION OF NITROGEN FERTILIZER APPLIED ON TOP OF UNBURNT SUGAR CANE RESIDUES*

Knowledge about the proper management of not-burned sugar cane is still limited, particularly regarding nitrogen fertilization. A field experiment was carried out to evaluate sugar cane yield, the balance of ^{15}N fertilizers in the soil-plant-residue system and ammonia loss by volatilization in sugarcane ratoon crop without straw burning prior to mechanical harvesting, comparing different locations of surface-applied nitrogen fertilizers. The sugar cane variety SP81-3250. Treatments were arranged in a complete randomized blocks, with four replicates. The treatments consisted of four N fertilizer sources: ammonium nitrate (AN), ammonium sulfate (AS), urea and Uran, applied over the residues in two ways: over the entire area or side dressed on both sides of the ratoon crop line, at a rate of 70 kg N ha⁻¹. The plots treated with AS and urea were divided in microplots with ^{15}N labeled fertilizers. The ammonia losses by volatilization were higher for urea and uran, which contain amidic nitrogen, especially when sidedressed in bands. Ammonia losses by volatilization caused a reduction in yield, whereas the location of the fertilizer-N had no influence on the sugar cane yield. Independent of the nitrogen source location, the recovery of ^{15}N from AS in sugar cane was twice as high as from urea. The nitrogen recovered in the soil-plant-trash system was 74 and 55 % of the N applied as AS and urea, respectively.

Index terms: *Saccharum* spp.; urea; uran; ammonium sulfate; ammonium nitrate; ^{15}N ; isotope technique.

INTRODUÇÃO

A colheita mecanizada sem queima da cana-de-açúcar deixa sobre o solo uma cobertura de palha, constituída por ponteiros, folhas secas e pedaços de colmo, de 10 a 20 Mg ha⁻¹ de material seco, que irá provocar mudanças significativas no manejo da cultura, com influência direta nas práticas de adubação de soqueiras. Nesse caso, destaca-se a fertilização nitrogenada, uma vez que o N é um dos nutrientes limitantes à produtividade e longevidade das soqueiras de cana-de-açúcar (Trivelin, 2000; Vitti, 2003).

O ciclo do N apresenta uma dinâmica complexa, pelas múltiplas transformações e por sua mobilidade no sistema solo-planta. Os fertilizantes nitrogenados aplicados no solo passam por uma série de transformações químicas e microbianas, que podem resultar em perdas. Nesse contexto, considerando o custo dos adubos nitrogenados, é fundamental o desenvolvimento de manejos adequados da adubação nitrogenada, que visem ao melhor aproveitamento de N pela cultura da cana-de-açúcar.

A permanência da palha sobre a superfície do solo no sistema “cana-crua” facilita as perdas de NH₃ por

volatilização de fontes amídico-amoniacais não incorporadas ao solo (Trivelin et al., 1998), assim como a imobilização microbiana de N no solo devido à alta relação C:N (Smith & Douglas, 1971; Vitti, 1998). Em solos com reduzida drenagem, a permanência da palha contribui para condições anóxicas, aumentando a possibilidade da desnitrificação; o excesso de umidade no solo também se torna prejudicial à cultura (Chapman et al., 1994).

Atualmente, a uréia é a fonte nitrogenada mais utilizada na agricultura brasileira, em razão do seu menor custo em relação aos demais fertilizantes nitrogenados sólidos. No entanto, a uréia, quando aplicada em superfície e sobre a palhada, pode diminuir muito sua eficiência agrônômica, como resultado da perda de amônia por volatilização (Prammanee et al., 1989; Freney et al., 1994; Trivelin et al., 2002a). Prammanee et al. (1989) observaram perda da ordem de 60 % do N-fertilizante aplicado sobre a palha de cana-de-açúcar, que foi atribuída à elevada taxa de hidrólise enzimática da uréia (Prammanee et al., 1989; Freney et al., 1994). Portanto, para que se possa aplicar o fertilizante nitrogenado sobre a palha, é condição básica que não ocorra perda de amônia por volatilização (Trivelin et al., 1997).

Em virtude das dificuldades encontradas no manejo da fertilização nitrogenada, nessas condições, são raros os trabalhos em que a cana-de-açúcar utiliza mais de 40 % do N-fertilizante (Yadav et al., 1990; Trivelin et al., 1996, 2002a,b), sendo essa baixa recuperação atribuída, em parte, ao efeito residual do fertilizante no solo, em razão de sua elevada imobilização (Ng Kee Kwong et al., 1986; Courtaillac, 1998), e às perdas do N no sistema solo-planta-atmosfera (Trivelin, 2000). Há casos em que as perdas são maiores que a própria recuperação do ^{15}N -fertilizante. Dessas perdas, destaca-se a gasosa, proveniente de um manejo inadequado, associado, principalmente, às condições edafoclimáticas (Ng Kee Kwong & Deville, 1994a).

Nesse contexto, realizou-se o trabalho em campo, com o objetivo de avaliar a produtividade e o balanço de ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta-palha em área de cana-soca sem queima, colhida mecanicamente, com diferentes adubos nitrogenados aplicados em faixa ou em área total.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em campo, em área comercial de cana-de-açúcar de terceiro corte (safra 1999/2000), colhida mecanicamente e sem a prévia despalha a fogo por vários anos, pertencente à Usina São Luiz (Grupo Dedini/SA), no município de Pirassununga, Estado de São Paulo. Nessa área não foi aplicada torta de filtro no plantio e vinhaça na cana-soca.

O cultivar de cana-de-açúcar foi o SP 81-3250, de bastante aceitação pelas suas características agrônomicas, principalmente por ser produtivo e rico em açúcar e se desenvolver bem em ambiente de produção de média a baixa fertilidade do solo.

O solo foi classificado como Neossolo Quartzarênico (composição granulométrica de 861 e 139 g kg⁻¹, respectivamente, de areia e argila), cujas características químicas de amostras obtidas na camada de 0-20 cm e nas entrelinhas da cultura foram: pH (CaCl₂): 5,2; P (resina): 7,0 mg dm⁻³; S - SO₄⁻²: 8,0 mg dm⁻³; K: 0,5 mmol_c dm⁻³; Ca: 14,0 mmol_c dm⁻³; Mg: 4,0 mmol_c dm⁻³; CTC: 37,5 mmol_c dm⁻³ e V (%): 50. Nas camadas do solo de 40-60 e de 60-80 cm, os teores de S-SO₄⁻² foram de 25 e 50 mg dm⁻³, respectivamente. Antes da instalação do experimento, a área possuía cobertura de palha de 14 Mg ha⁻¹ de matéria seca, com 62 kg ha⁻¹ de N.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso em um fatorial 2 x 4 (duas localizações dos fertilizantes nitrogenados e quatro fontes de N), com quatro repetições. Os fertilizantes nitrogenados foram: nitrato de amônio (NA), sulfato de amônio (SA), uréia (U) e uran (UA), aplicados na dose de 70 kg ha⁻¹ de N, em área total ou em faixa. A largura da faixa foi em

torno de 15 cm, paralela e distante 25 cm nos dois lados da linha da cana-de-açúcar. A fonte UA (32 % de N) constituiu-se da mistura fluida composta de U (14 % do N) e de NA (18 % do N).

A área de cada parcela foi de 225 m², constituída de 10 segmentos de linhas de soqueira, com 15 m de comprimento e espaçadas de 1,5 m. Em seu interior foram instaladas microparcels, com dimensões de 2 m de comprimento e 1,5 m de largura, totalizando 3 m², que receberam os fertilizantes marcados com ^{15}N (U e SA marcados, respectivamente, com 3,5 e 3,2 % em átomos de ^{15}N). As microparcels foram cobertas com tela de náilon (com cerca de 3 cm de diâmetro), conhecida por tela de "pinteiro", a fim de evitar a saída da palha pelo vento, bem como a entrada de outro material externo à área considerada. Em todas as parcelas foram aplicados 150 kg ha⁻¹ de K, junto com as fontes de N.

Imediatamente após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados (1/9/1999) e no local de aplicação deles, foram instalados os coletores de NH₃ semi-abertos estáticos, um por parcela, contendo espumas embebidas em H₂SO₄, como absorvedor de amônia (Lara Cabezas et al., 1999). As determinações das perdas de NH₃ do solo foram feitas no período de 2 a 21 de setembro de 1999. A média das temperaturas mínimas e máximas no período foi em torno de 22 °C e a pluviosidade de 38 mm, ocorrendo precipitações de 3 e 35 mm aos 10 e 15 dias após a adubação, respectivamente. Na figura 1 são apresentados os valores mensais de precipitação do ano/safra agrícola de 1999/2000, fornecidos pela Usina São Luiz-Dedini, em Pirassununga-SP.

A coleta das espumas para determinação da volatilização de NH₃ foi realizada durante 20 dias (com amostragens a cada intervalo de 2-3 dias), após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Os procedimentos na adição de água ao solo no interior dos coletores após chuva, troca de absorvedor e extração do NH₄⁺ retido nos absorvedores, bem como a

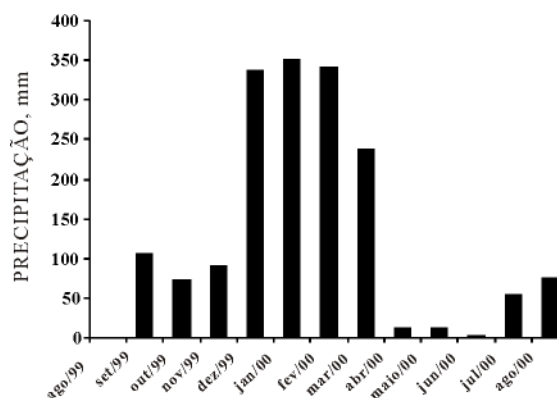


Figura 1. Precipitação mensal no ano/safra agrícola de 1999/2000 (Usina São Luiz - Dedini, em Pirassununga, SP).

determinação do N-NH₃ e os cálculos, considerando a eficiência do aparelho coletor, foram realizados conforme Lara Cabezas et al. (1999).

Para avaliar a produção de colmos, em agosto de 2000, foram colhidas as plantas de três linhas contíguas de dois metros cada. Para análise isotópica de ¹⁵N, foi colhida, manualmente, a parte aérea de plantas de cana-de-açúcar no centro das microparcelas (1 m) e em posições contíguas nas linhas adjacentes à microparcela, conforme método definido por Trivelin et al. (1994), separando-se amostras de folhas secas, ponteiros e colmos. Quantificou-se a massa de palha remanescente na superfície do solo das microparcelas, sendo separada a que ficou misturada ao solo, por peneiramento em malha de 1 mm. Em subamostra desse material, foram feitas as determinações químicas e isotópicas, a fim de se quantificar o N-fertilizante imobilizado por microrganismos e, ou, a presença de raízes-¹⁵N que se desenvolveram junto ao resíduo cultural e causaram a marcação da palha com ¹⁵N.

Após a colheita, determinou-se a massa úmida de todo o material vegetal: colmo, ponteiro, folha seca e sistema radicular. Colheu-se todo o sistema radicular (colmos subterrâneos-rizomas e raízes) localizado no centro da subparcela com fertilizante-¹⁵N em trincheira de 1 m de comprimento por 1,5 m de largura e 0,6 m de profundidade. Todo o solo foi peneirado, separando-se o sistema radicular, e a seguir lavado. Depois da moagem e homogeneização de cada amostra úmida, retirou-se uma subamostra, que foi seca em estufa (72 h a 65 °C), sendo determinada a umidade desse material. O material seco foi passado em moinho Wiley e usado nas determinações químicas e de N-total e de abundância de ¹⁵N (% em átomos de ¹⁵N), no espectrômetro de massa ANCA/SL, modelo 20/20 da Europa Scientific, Krewé, UK.

O balanço de ¹⁵N dos fertilizantes foi obtido por meio do acúmulo na cana-de-açúcar (parte aérea e sistema radicular), das perdas estimadas do solo de

N-NH₃ por volatilização (Lara Cabezas et al., 1999), da imobilização do ¹⁵N-fertilizante na palha e da recuperação no solo. Consideraram-se como déficit no balanço as perdas no solo (lixiviação e desnitrificação) e a parte aérea das plantas na forma de NH₃ junto à corrente transpiratória, principalmente em folhas senescentes.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, utilizando o teste F a 95 %. Posteriormente, para as causas de variação significativas, foram aplicados os testes de significância de Tukey (p < 0,05) nos tratamentos que envolveram as fontes U, SA, UA e NA e localização (aplicação sobre a palha em área total ou em faixa).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As perdas de NH₃ por volatilização de U e UA foram superiores às demais, devido ao componente amídico, sobretudo na aplicação em faixa (Quadro 1). No período de 20 dias após a adubação, no tratamento com U em faixa, verificou-se perda de 46 % do N aplicado, enquanto em área total a perda foi menor (37 %).

A maior volatilização com as fontes contendo N-amídico em faixa pode estar relacionada à concentração do N-fertilizante em uma menor área, fazendo com que a urease da palha e, ou, do solo atuasse mais intensamente na hidrólise da U. Santos et al. (1991) observaram aumento na taxa de hidrólise da U com o incremento na concentração do fertilizante, porém não proporcional às doses avaliadas. Nessa reação, há consumo de H⁺ do meio, elevando, conseqüentemente, o pH, o que favorece a volatilização de NH₃, principalmente com o aumento das doses de U (Singh & Nye, 1984; Kiehl, 1989). As menores perdas por volatilização ocorreram nas fontes NA e SA (Quadro 1).

Quadro 1. Nitrogênio volatilizado em 20 dias após a adubação e produtividade de colmos em relação à localização dos adubos nitrogenados em faixa e em área total (dose de N de 70 kg ha⁻¹)

Fonte de N	N-NH ₃ volatilizado		Produção de colmos	
	Faixa	Área total	Faixa	Área total
	kg ha ⁻¹		Mg ha ⁻¹	
Sulfato de amônio	2,0 ± 0,1 a A	3,0 ± 0,1 a A	72,8 a* A	76,0 a A
Nitrato de amônio	2,0 ± 0,1 a A	4,2 ± 0,1 a A	63,5 b A	65,6 a b A
Uran	12,8 ± 0,1 b A	9,3 ± 0,1 b B	60,6 b A	63,7 b A
Uréia	32,4 ± 0,1 c A	26,0 ± 0,1 c B	60,0 b A	57,0 b A
CV (%)		9,8		13,2

±: Desvio-padrão da média; *: Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na vertical e maiúscula na horizontal, não diferem entre si a 5 % pelo teste Tukey.

A camada de palha sobre a superfície do solo, além de promover atividade ureolítica, também favorece as perdas de NH₃, por funcionar como uma barreira entre o N-fertilizante e o solo, fazendo com que o NH₃ produto da hidrólise da uréia permaneça junto aos restos culturais. Portanto, a aplicação de fertilizante nitrogenado de baixa estabilidade química (fonte amídica) na superfície do solo e sobre os restos culturais de cana-de-açúcar, associada à temperatura elevada, baixa precipitação e concentração do fertilizante (aplicação em faixa), contribuiu para o aumento da perda de N-NH₃ por volatilização (Kiehl, 1989; Prammanee et al., 1989; Vitti, 2003).

Para o UA, a volatilização foi menor que a da U, tanto na aplicação em faixa como em área total, mas o comportamento foi semelhante, uma vez que as perdas foram maiores na aplicação em faixa (Quadro 1). Esses resultados assemelharam-se ao que foi discutido anteriormente na condição em que se concentrou o fertilizante na aplicação em faixa.

No que se refere à produção de colmos, não houve diferença na aplicação das fontes nitrogenadas em faixa e área total. A maior produtividade com SA, em relação ao NA, na aplicação em faixa deve-se, provavelmente, ao efeito do S prontamente disponível, visto que as duas fontes apresentaram reduzida volatilização. A menor produtividade com o UA e, principalmente, com U se deveu, também, às perdas por volatilização. Para as fontes que apresentaram baixa volatilização, mesmo não havendo diferença na produtividade, poderá ocorrer, nas safras (cortes) consecutivas, efeito residual dessa adubação nitrogenada, uma vez que a cultura da cana-de-açúcar é considerada perene.

As perdas de N por volatilização podem comprometer o estoque desse elemento no sistema solo-planta. Nas duas fontes não houve diferença entre aplicação em faixa e em área total nos diferentes compartimentos analisados, exceto para a palha residual, que mostrou maior valor em área total (Quadro 2). Isso se deveu, provavelmente, à maior superfície de contato entre o adubo e a palha, resultando na imobilização microbiana do N. Ainda, em relação ao N-fertilizante na palha residual, tanto na aplicação em faixa como em área total, parte pode ter originado da imobilização microbiana, como também de raízes da cana-de-açúcar marcadas em ¹⁵N, que se desenvolveram superficialmente, junto à camada de palha (Faroni et al., 2003). Essas raízes finas, beneficiadas pelas condições microclimáticas da cobertura do solo, fizeram parte da amostra de palha, levando ao enriquecimento em ¹⁵N do material (Faroni et al., 2003; Trivelin et al., 2002b). Por outro lado, os valores de recuperação dos N fertilizantes de 8,3 e 8,5 % presentes na palha residual, respectivamente, para SA e U, aplicados em área total, foram semelhantes aos obtidos por Gava et al. (2005). Esses autores constataram recuperação de 8 ± 2 % do N-fertilizante na palha residual ao aplicarem a mistura de vinhaça (100 m³ ha⁻¹) e U (100 kg ha⁻¹ de N) em solo de textura argilosa. Já Trivelin et al. (2002a), quando aplicaram o fertilizante em profundidade, obtiveram recuperação de 8 ± 1 %. Quando adicionaram U (solução concentrada) em área total, após aplicação de vinhaça ou KCl, a recuperação foi maior (14 ± 2,5 %) em relação à do presente estudo, provavelmente por terem realizado irrigação nos períodos de estiagem (916 mm).

Observa-se, ainda (Quadro 2), maior recuperação total média do N-fertilizante do SA, em relação à U,

Quadro 2. Recuperação do nitrogênio dos fertilizantes: sulfato de amônio e uréia aplicados na dose de 70 kg ha⁻¹ de N, em faixa (F) e em área total (AT), no sistema solo-cana-de-açúcar-palha

Fonte de N	Recuperação do N das fontes nitrogenadas (¹⁵ N)							
	Planta toda ⁽¹⁾		Palha		N Residual ⁽²⁾		Recuperação total ⁽³⁾	
	F	AT	F	AT	F	AT	F	AT
	kg ha ⁻¹							
Sulfato de amônio	21,2 a	21,6 a	2,0 a	5,8 a	30,1 a	37,3 a	51,3 a	52,7a
Uréia	11,6 b	9,7 b	3,4 a	6,0 a	26,7 a	29,3 a	38,4 b	39,1b
CV (%)	20,1		50,4		19,7		20,3	
	%							
Sulfato de amônio	30,3 a	30,9 a	2,9 b	8,3 a	43,0 a	53,3 a	73,3 a	75,3 a
Uréia	16,5 b	13,9 b	4,8 b	8,5 a	38,1 a	41,8 a	54,8 b	55,8 b
CV (%)	20,3		49,6		19,7		16,7	

⁽¹⁾ colmo + ponteiro + folha seca + sistema radicular. ⁽²⁾ sistema radicular, solo e palha. ⁽³⁾ solo-cana-de-açúcar-palha; médias seguidas pela mesma letra na vertical e na horizontal, em cada variável, não diferem entre si a 5 % pelo teste Tukey.

na aplicação em faixa ou em área total, em média de 74 %, enquanto para a U a recuperação foi de 55 %. Essa menor recuperação do N-U deveu-se à maior perda de N por volatilização no período inicial da aplicação do fertilizante (Quadro 1). Trivelin et al. (2002a) obtiveram recuperação de 80 % do N-U aplicado em profundidade no solo, comparativamente a 50 % quando feita a aplicação em superfície, ao passo que a U aplicada em profundidade apresentou perdas de NH_3 por volatilização insignificantes, próximas ao verificado com o SA neste trabalho.

No caso do N-residual, a diferença não foi significativa, sendo a recuperação de 48 e 40 % para o SA e U; respectivamente. Courtaillac et al. (1998) constataram variação na utilização do N-fertilizante de 6 e 34 %, sendo alta a proporção do imobilizado no solo: de 30 a 40 %.

Na U aplicada em área total ou em faixa, a volatilização de NH_3 foi de 37 e 46 %, respectivamente. Somando esses valores com os de N-recuperado, pode-se estimar o destino de mais de 90 % do N-U aplicado. Os restantes 10 % são considerados como outras perdas que não foram quantificadas, como a desnitrificação, a lixiviação e a perda de NH_3 pela parte aérea da cultura.

O N-SA, aplicado em faixa ou em área total, apresentou comportamento diferente do da U, uma vez que sua recuperação foi em média de 74 %, sendo reduzida a perda por volatilização (3 %). Pelo balanço do N-SA, constatou-se que as demais perdas (lixiviação, desnitrificação e pela parte aérea) foram maiores que as do N-U e da ordem de 23 % do N-SA. Acredita-se que a perda principal possa ter ocorrido pela parte aérea das plantas, visto que a absorção do N-fertilizante dá-se, em grande parte, nos primeiros estádios vegetativos da cultura (Salcedo & Sampaio, 1984; Ng Kee Kwong et al., 1987; Ng Kee Kwong & Deville, 1994b; Trivelin et al., 1996; Vitti, 2003); do meio ao final do ciclo, com a senescência das folhas ocorrem emissões de amônia (Holtan-Hartwing & Bockman, 1994; Trivelin et al., 2002a; Vitti, 2003).

Pode-se considerar que as perdas por lixiviação e desnitrificação foram praticamente insignificantes se comparadas às perdas pela parte aérea da cultura. Dentre os fatores que reforçam essa afirmação, destacam-se: o período maior absorção do N-fertilizante (início do desenvolvimento da cultura) (Vitti, 2003) não coincidiu com o de elevada precipitação; e o solo continha em sua composição granulométrica cerca de 90 % de areia e teor de matéria orgânica baixo, o que deveria favorecer a lixiviação e pouco a desnitrificação, porém isso não ocorreu, tendo em vista a quantidade insignificante de N-fertilizante encontrada na camada de 80–110 cm (Vitti, 2003). Considerando a recuperação total do N-U (planta, solo e palha) de 55 % e a perda média por volatilização de 42 % (U aplicada em faixa e área total), obtém-se, praticamente, a recuperação do N do fertilizante aplicado.

Segundo Trivelin (2000), o N absorvido pelos vegetais pode, em parte, perder-se tanto pelas raízes, por exsudação, como pela parte aérea, por volatilização, principalmente na forma de NH_3 , por lixiviação de compostos solúveis na água das chuvas, ou mesmo por gutação, o que acarreta, muitas vezes, subestimativas nas determinações da utilização do N oriundo dos fertilizantes marcados com ^{15}N , feitas na maturidade das culturas. Durante a senescência foliar, o aumento da hidrólise de proteínas é acompanhado pela redução nas atividades das enzimas glutamina sintetase (GS) e glutamato sintase (GOGAT), principais responsáveis pela assimilação da NH_3 no metabolismo do N nas plantas superiores. A redução na atividade dessas enzimas resulta em perdas de NH_3 junto à corrente transpiratória de folhas senescentes. Essas perdas dependem do equilíbrio, em solução, entre a forma NH_3 e a iônica NH_4^+ , que é influenciado pela temperatura e pelo pH do meio (Holtan-Hartwing & Bockman, 1994).

A recuperação do N-SA pela cultura foi elevada se comparada com a da U, que se enquadrava na faixa de 10 a 20 %, normalmente encontrada na literatura (Trivelin et al., 1996; Gava et al., 2005). Nas Ilhas Maurícios, Wong You Cheong et al. (1980) obtiveram recuperação de N na parte aérea da cana-de-açúcar de 21 a 48 %, utilizando as fontes SA e NA, com influência do tipo de solo, das condições climáticas e da fonte nitrogenada. Ng Kee Kwong & Deville (1994a) conseguiram aumentar a recuperação do N-U (120 kg ha^{-1}) de 19 para cerca de 35 % aplicando o adubo na água e irrigando por gotejamento, sem, contudo, elevar a produtividade. Em Taiwan, Weng et al. (1991) obtiveram recuperação de 27 e 19 % para SA e U, respectivamente; a aplicação dos adubos no solo a 10 cm de profundidade, comparada à superficial, mostrou maior recuperação. Na Austrália, Chapman et al. (1994) verificaram recuperação do N-U para a planta toda, em três sistemas de manejo com resíduos culturais no solo, da ordem de 18 e 33 %, para a U aplicada em superfície ou em profundidade, respectivamente.

Deve ser destacada a expressiva recuperação de N na planta toda da fonte SA, podendo-se inferir que essa maior recuperação, comparada à da U, irá proporcionar maior vigor da rebrota, devido ao acúmulo de N na parte subterrânea da cultura (Vitti, 2003). Segundo Trivelin et al. (2002b), apenas 20 % do N-fertilizante absorvido pela planta é exportado com a remoção dos colmos, para produção de açúcar e álcool; em média, independentemente da dose de N utilizada (30, 60 e 90 kg ha^{-1} de $^{15}\text{N-U}$), a planta recuperou 20, 15, 40 e 25 % do ^{15}N -fertilizante, em colmos, ponteiro, folhas secas e parte subterrânea (raízes e rizoma), respectivamente.

Possivelmente, a maior recuperação do N-SA se deva ao melhor desenvolvimento da cultura e ao efeito sinérgico da absorção N/S. Segundo Courtaillac et al. (1998), o rendimento e a absorção do N pela cana-de-

açúcar são influenciados pela produtividade da cultura, ou seja, em glebas de maior produtividade há maior absorção de N-fertilizante, aumentando, assim, a recuperação.

CONCLUSÕES

1. As fontes nitrogenadas com N-amídico (uréia e uran) apresentaram maiores perdas de NH₃ por volatilização, principalmente quando aplicadas em faixa.

2. As elevadas perdas de N por volatilização causaram redução na produtividade da cana-de-açúcar.

3. A localização dos fertilizantes nitrogenados, em faixa ou em área total, não influenciou a produtividade de colmos.

4. A utilização do N do sulfato de amônio pela cana-de-açúcar foi o dobro em relação à da uréia.

5. No balanço do ¹⁵N-fertilizante, a recuperação no sistema solo-planta do sulfato de amônio e uréia foi, em média, de 74 e 55 %, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela bolsa de estudo concedida ao primeiro autor. Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e ao Técnico José Anderson Forti, pela valiosa colaboração, desde a implantação até a colheita do experimento; e à Usina São Luiz – DEDINI, na pessoa do Gerente de Produção Técnica, Engenheiro-Agrônomo Luiz Fernando F. de Siqueira e do Biólogo Carlos Menegatti, pela facilidade oferecida e pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

LITERATURA CITADA

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. *Aust. 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. *Nut. Cycl. Agroecosys.*, 52:9-17, 1998.

FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; MANZONI, C.S.; PENATTI, C.P. & TRIVELIN, P.C.O. Degradação da palha (¹⁵N) de cana-de-açúcar em dois anos consecutivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Anais. Ribeirão Preto, Universidade Estadual de São Paulo/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM

FRENEY, J.R.; DENMED, O.T.; WOOD, A.W. & SAFFIGNA, P.G. Ammonia loss following urea addition to sugar trash blankets. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16., Jounsville, 1994. Proceedings. Jounsville, Watson Fergunson, 1994. p.114-121.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. & OLIVEIRA, M.W. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:689-695, 2005.

HOLTAN-HARTWING, L. & BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. *Norwegian J. Agric. Sci.*, 14:1-41, 1994. (Supplement)

KIEHL, J.C. Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de uréia. *R. Bras. Ci. Solo*, 13:75-80, 1989.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; SANTANA, D.G. & GASCHO, G.J. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 30:389-406, 1999.

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, 1994a.

NG KEE KWONG, K.F. & DEVILLE, J. The course of fertilizer nitrogen uptake by rain fed sugarcane in Mauritius. *J. Agric. Sci.*, 122:385-391, 1994b.

NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P.C. & RIVIERE, V. Biological immobilization of fertilizer nitrogen in humid tropical soils of Mauritius. *Soil Sci.*, 141:195-199, 1986.

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.

PRAMMANEE, P.G.; SAFFIGNA, P.G.; WOOD, A.W. & FRENEY, J.R. Loss of nitrogen from urea and ammonium sulfate applied to sugar cane crop residues. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 11., Mackay, 1989. Proceedings. Mackay, Watson Fergunson, 1989. p.76-84.

SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Eficiência de utilização de uréia-¹⁵N pela cana-soca em tabuleiro costeiro de Pernambuco. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE TÉCNICAS NUCLEARES NA PRODUÇÃO DE PLANTAS AGRÍCOLAS, 1984, Piracicaba. Anais. Piracicaba, CENA/USP, 1984. p.205-209.

SANTOS, A.R.; VALLE, F.R. & SANTOS, J.A.G. Avaliação de parâmetros cinéticos da hidrólise da uréia em solos do Sul de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:309-313, 1991.

SINGH, R. & NYE, P.H. The effect of soil pH and high urea concentrations on urease activity in soil. *J. Soil Sci.*, 35:519-527, 1984.

SMITH, J.H. & DOUGLAS, C.L. Wheat straw decomposition in the field. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35:269-272, 1971.

- TRIVELIN, P.C.O. Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: Três casos estudados com o uso do traçador ^{15}N . Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2000. 143p. (Tese Livre-Docência)
- TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. & MURAOKA, T. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte I: Estabilidade química da mistura. STAB - Açúcar, Álcool Subpr., 16:26-29, 1997.
- TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W. & MURAOKA, T. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte II: Perdas por volatilização de amônia e recuperação do ^{15}N aplicado ao solo. STAB - Açúcar, Álcool Subpr., 16:23-29, 1998.
- 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. *Sci. Agric.*, 51:226-234, 1994.
- 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.; VICTORIA, R.L. & RODRIQUES, J.C. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia- ^{15}N e uréia- ^{15}N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesq. Agropec. Bras.*, 31:89-99, 1996.
- 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 resíduo da cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:637-646, 2002b.
- VITTI, A.C. Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: Manejo e efeito na produtividade. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2003. 114p. (Tese de Doutorado)
- VITTI, A.C. Utilização pela cana-de-açúcar (cana planta) do nitrogênio da uréia (^{15}N) e do mineralizado no solo em sistemas de manejo com e sem a queima. Piracicaba, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1998. 93p. (Tese de Mestrado)
- WENG, T.; CHAN, Y. & LI, S.W. 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, Piracicaba, 1978. Proceedings. Vienna, IAEA, 1980. p.351-367.
- YADAV, L.R.; KUMAR, R. & VERMA, R.S. Effects of nitrogen applied through different carriers on yield and quality of sugarcane. *J. Agric. Sci.*, 114:225-230, 1990.