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

**Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar
relacionados à adubação nitrogenada**

Rafael Otto

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

Piracicaba

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Otto, Rafael

Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à
adubação nitrogenada / Rafael Otto. - - Piracicaba, 2007.
117 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Adubação 2. Cana-de-açúcar 3. Fertilizantes nitrogenados 4. Produtividade 5. Raiz
I. Título

CDD 633.61

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Rafael Otto
Engenheiro Agrônomo

**Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à
adubação nitrogenada**

Orientador:
Prof. Dr. PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

Piracicaba
2007

Aos meus pais,

Vera Lucia e Reinaldo, pela educação, carinho e incentivo;

À minhas irmãs,

Jeruza e Débora, pelas lembranças que levarei por toda vida;

Aos meus avôs,

Hilário e Hilda, pelo exemplo de humildade e simplicidade;

Aos demais familiares,

Por fazerem parte da minha formação pessoal.

OFEREÇO

À **Marina S. Gentil**,

Pelo amor, companheirismo e confiança.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pela orientação exemplar, dedicação e amizade.

À ESALQ, pelo ensino de qualidade e oportunidades.

Ao Departamento de Ciência do Solo e Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelo aperfeiçoamento e oportunidades oferecidas.

Ao CENA/USP, em especial ao Laboratório de Isótopos Estáveis, pelo suporte técnico, laboratorial e pessoal.

À FAPESP (Processo nº 06/51251-0) pela concessão da bolsa de estudos de outubro de 2006 a janeiro de 2008.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos no período de março a setembro de 2006.

Aos Professores Godofredo Cesar Vitti e Pedro Henrique de Cerqueira Luz, pela amizade e iniciação no meio científico.

Aos colegas de Pós-Graduação: Henrique Coutinho Junqueira Franco, Carlos Eduardo Faroni, André Cesar Vitti, Virgínia Damin, Isabela Rodrigues Bologna, Alessandro dos Santos Brito, Pablo Javier Ghiberto, pela amizade, valiosos auxílios e agradável convívio.

Aos estagiários: Caroline Lopes, Matheus Olivetti Trivelin, João Gabriel Tovajar, Rafael Toloti Schiavuzzo, Viviane Costa Martins, Danilo Alves Martins, Diego Juliani de Campos, sem os quais grande parte do que será apresentado não seria possível.

À equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis (CENA/USP): Professores José Alberto Bendassolli, Jefferson Mortatti e Helder de Oliveira; e aos funcionários Clélber, Hugo, Miguel, José A. Bonassi (Pingin), Magda, Bento, Juliana e Glauco pelo auxílio constante e prazeroso convívio.

Aos amigos Renato Alessandro Lopes, Carlos Roberto Sant'ana Filho, Alexandre Martins Fernandes, João Paulo R. Bibian, Diego Vendramini, que tornaram a rotina mais agradável.

Às Usinas Santa Adélia, São Luiz e São Martinho, por cederem as áreas para as pesquisas, assim como as equipes de campo, sem as quais nada disto seria possível.

Ao Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), especialmente José Anderson Forti, Carlos Eduardo Faroni, Claudimir Pedro Penatti e José Luiz Donzelli, pela parceria no Projeto e apoio nas avaliações de campo.

Aos colegas de república durante a pós graduação: José Eduardo Holler Branco (Mineiro), Renato Shinkai Gentil (Shimu), José Thiago das Neves Neto (Neto), Roberto Rodrigues Trapé (Bob), pelos momentos de alegria, companheirismo e apoio.

À República BalakoBako, pelos ótimos momentos durante a graduação e pelas amizades que levarei por toda a vida.

Ao GAPE (Grupo de Apoio à Pesquisa e Extensão), por possibilitar contato com aqueles que mais necessitam das informações geradas pela pesquisa: o agricultor.

A todos aqueles que, embora não citados nesse texto, participaram de mais essa etapa da minha vida.

MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
Referências	13
2 DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR AVALIADA POR DOIS MÉTODOS: MONÓLITO E SONDA	15
Resumo	15
Abstract	16
2.1 Introdução	17
2.1.1 A carência de pesquisas sobre o sistema radicular	17
2.1.2 Métodos de avaliação do sistema radicular.....	18
2.2 Material e métodos	20
2.2.1 Caracterização do solo.....	20
2.2.2 Avaliação do sistema radicular.....	21
2.2.3 Raízes metabolicamente ativas.....	24
2.2.4 Análise estatística	27
2.3 Resultados e discussão.....	27
2.3.1 Massa total de raízes em função dos métodos de avaliação	27
2.3.2 Distribuição do sistema radicular em função dos métodos de avaliação	30
2.3.3 Distribuição do sistema radicular em função da fertilização nitrogenada	31
2.3.4 Raízes metabolicamente ativas.....	37
2.4 Conclusões.....	38
Referências	39
3 ACÚMULO DE FITOMASSA E NITROGÊNIO DURANTE O CICLO DA CANA-PLANTA RELACIONADO COM A ADUBAÇÃO NITROGENADA	42
Resumo	42
Abstract	42
3.1 Introdução	43
3.1.1 Adubação nitrogenada de cana-planta.....	43

3.1.2 O desenvolvimento de raízes de cana-de-açúcar	46
3.1.3 A adubação nitrogenada e o crescimento de raízes	50
3.2 Material e métodos	52
3.2.1 Caracterização dos solos	52
3.2.2 Instalação e delineamento experimental	53
3.2.3 Sistema radicular.....	54
3.2.4 Parte aérea.....	56
3.2.5 Análise estatística	57
3.3 Resultados e discussões.....	57
3.3.1 LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico - Usina Santa Adélia	60
Desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular.....	60
Acúmulo de nitrogênio na parte aérea e sistema radicular	64
3.3.2 LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Eutrófico - Usina São Luiz.....	67
Desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular.....	67
Acúmulo de nitrogênio na parte aérea e sistema radicular	72
3.4 Conclusões.....	74
Referências	75
4 PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À ADUBAÇÃO NITROGENADA, AO CRESCIMENTO DE RAÍZES E AO DÉFICIT HÍDRICO	78
Resumo	78
Abstract	79
4.1 Introdução	80
4.1.1 Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar.....	80
4.1.2 A adubação nitrogenada, o déficit hídrico e o crescimento de raízes	82
4.2 Material e Métodos	84
4.2.1 Local e cultivar	84
4.2.2 Caracterização dos solos	84
4.2.3 Preparo do solo e instalação	85
4.2.4 Delineamento experimental e tratamentos	86
4.2.5 Evapotranspiração e balanço hídrico da cultura.....	87
4.2.6 Avaliações do sistema radicular	88

4.2.7 Produtividade de colmos e açúcar	91
4.2.8 Análise estatística	91
4.3 Resultados	91
4.3.1 Balanço hídrico climatológico	91
4.3.2 Desenvolvimento radicular e produtividade.....	98
4.3.2.1 Cana-planta (1º corte)	98
4.3.2.2 Cana-soca (2º corte)	102
4.4 Discussão.....	108
4.4.1 Produtividade da cana-planta em função da adubação nitrogenada.....	108
4.4.2 Sistema radicular na cana-planta em função da adubação nitrogenada.....	110
4.4.3 O papel do sistema radicular na manutenção de elevadas produtividades.....	111
4.4.4 Produtividade da soqueira em função da fertilização nitrogenada	112
4.4.5 Sistema radicular da cana-soca em função da adubação nitrogenada de plantio e a realizada após o 1º corte.....	113
4.4. Conclusões.....	113
Referências	114

RESUMO

Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada

Estudos de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar normalmente se restringem em avaliar os efeitos no crescimento da parte-aérea. Há evidências de que a fertilização nitrogenada favorece o crescimento de raízes, a absorção de nutrientes e a produtividade da cultura. Objetivou-se com o trabalho avaliar o desenvolvimento de raízes e produtividade da cana-de-açúcar (SP81 3250) nos ciclos de cana-planta e 1ª soca. Foram conduzidos três experimentos, um em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (LVAe) e outro em LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd) (ambos de textura média) e um em LATOSSOLO VERMELHO eutrófico (LVe) argiloso. Na cana-planta os tratamentos constaram de doses de nitrogênio (N) de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ e uma testemunha (sem N mineral), em blocos ao acaso, com quatro repetições. Na cana-soca cada parcela da cana-planta foi dividida em quatro subparcelas, às quais foram aplicadas doses de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ N e uma testemunha. No 1º corte o sistema radicular foi avaliado em todos os tratamentos nos três solos. No 2º corte, o sistema radicular foi avaliado somente nas subparcelas dos tratamentos de plantio testemunha e 120 kg ha⁻¹ N, no LVAe e LVd. Para o experimento no solo LVe, somente nas subparcelas testemunha e 150 kg ha⁻¹ N das parcelas principais testemunha e 120 kg ha⁻¹ N foi avaliado o sistema radicular da cana soca. A amostragem de raízes com sonda resultou em massa de raízes que não diferiu da avaliação em monólito, indicando que esse método pode ser usado para avaliações de raízes de cana-de-açúcar. A fertilização nitrogenada de plantio promoveu maior concentração de raízes até 0,2 m no LVd. No ciclo da cana-planta, no LVAe e no LVd houve crescimento pronunciado de raízes de outubro de 2005 a fevereiro de 2006, com redução da massa de fevereiro até a colheita, porém sem afetar o desenvolvimento da parte aérea. Em fevereiro, 20% do N acumulado na planta toda foi encontrado nas raízes, diminuindo para 5% na colheita como decorrência da redução da massa de raízes. As doses de N no plantio favoreceram o crescimento de raízes e a produtividade de colmos no LVAe e no LVe, e o acúmulo de sacarose no LVd. As doses de N na soqueira favoreceram a produtividade de colmos e açúcar nos três solos. No 1º corte, foi obtida maior produtividade de colmos (152 t ha⁻¹) e menor massa de raízes (1,35 t ha⁻¹) no LVe em relação ao LVAe e LVd (139 e 145 t ha⁻¹ de colmos e 2,5 e 2,4 t ha⁻¹ de raízes, respectivamente). Em relação ao 1º corte, a produtividade do 2º corte se manteve estável no LVd (120 t ha⁻¹) e diminuiu drasticamente no LVe (80 t ha⁻¹). Esse fato foi devido à pequena massa de raízes no LVe no 1º corte, tendo em vista que nas duas áreas ocorreu acentuado déficit hídrico em alguns meses antes e após o 1º corte. A adubação nitrogenada de soqueira favoreceu o crescimento de raízes somente no LVe, porém a massa de raízes diminuiu do 1º para o 2º corte, enquanto que no LVAe e no LVd a massa permaneceu constante.

Palavras-chave: Sistema radicular; Déficit hídrico; Cana-planta; Cana-soca

ABSTRACT

Root growth and sugarcane productivity related to nitrogen fertilization

Studies of nitrogen fertilization in sugarcane are usually restricted to evaluations of the effects on growth and productivity of the shoots. There are evidences that nitrogen fertilization favors the growth of roots, the absorption of nutrients and sugarcane productivity. This work was designed to evaluate root development and sugarcane productivity (SP81 3250) in the crop cycles of the cane-plant and of the first ratoon. Three experiments were conducted in a randomized blocks design, with four replications, in three different soils, a Typic Eutruxox (TE) and an Arenic Kandistults (AK) (both of medium texture), and a clayey Rhodic Eutruxox (RE). Treatments for the cane-plant were nitrogen (N) rates of 0, 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ N. In the first ratoon crop each plot of cane-plant was split in four subplots to which rates of 0, 50, 100 and 150 kg ha⁻¹ of N was applied. In the first harvest, the root system was evaluated in all of the treatments applied on the three soils (TE, AK and RE), whereas in the second harvest the root system was evaluated only for the subplots of the planting treatments control and 120 kg ha⁻¹ N in TE and AK. For the experiment in the RE soil, only control and 150 kg ha⁻¹ N subplots of the control and 120 kg ha⁻¹ N main plots had the ratoon root system evaluated. The sampling of roots with probe resulted in a mass of roots that did not differ from the monolith evaluation, indicating that this method can be used for the evaluation of sugarcane roots. Nitrogen fertilization at planting resulted in a higher concentration of roots in the top 0.2 m in AK. There was a pronounced growth of roots in TE and in AK from October, 2005 to February, 2006, and a reduction of the mass from February until harvest; however development of the above ground part of the plant was not affected. Until February, about 20% of accumulated N in the whole plant was found in the roots, decreasing to 5% at harvest, as a consequence of root mass reduction. The N rates applied to the cane-plant favored the roots growth and crop productivity in TE and RE, and the sucrose accumulation in AK. The rates of fertilizer-N in the ratoon favored the productivity of stalks and sugar yield in the three soils. In the first harvest, it was obtained a larger productivity of stalks (152 t ha⁻¹) and a smaller mass of roots (1.35 t ha⁻¹) in RE in relation to TE and AK (139 and 145 t ha⁻¹ of stalks and 2.5 and 2.4 t ha⁻¹ of roots, respectively). The productivity of the second harvest was similar to that of the first harvest in AK (120 t ha⁻¹), but it decreased drastically in RE (80 t ha⁻¹), as a consequence of the small mass of roots in RE in the first harvest, attributed to a high water deficit in the months prior to and after harvest. Nitrogen fertilization applied after the first harvest influenced root growth only in the RE soil; however the mass of roots decreased from the first to the second harvest while in the TE and AK soils the root mass remained constant.

Keywords: Root System; Water deficit; Cane-plant; First ratoon crop

1 INTRODUÇÃO

“Mude suas opiniões, sustente seus princípios;
Troque suas folhas, mas mantenha intactas suas raízes.”

Victor Hugo (1802-1885) escritor francês

Até meados do século passado, as raízes foram consideradas a “metade oculta” dos vegetais (WAISEL et al., 2002, apud ZONTA et al., 2006), com significativa escassez de resultados de pesquisa nesse tema em todo o mundo. As razões para essa carência de dados são historicamente explicáveis pelas dificuldades metodológicas, pela própria inacessibilidade ao sistema radicular como objeto de experimentação, pela sua complexidade tridimensional e por sua marcada variabilidade espacial e temporal (NOORDWIJK, 1993, apud ZONTA et al., 2006). Durante muitos anos, o tempo gasto nas atividades de quantificação do sistema radicular e as incertezas quanto aos resultados constituíram fortes desestímulos ao trabalho com raízes (ZONTA et al., 2006). Atualmente existe consenso acerca da importância de estudos sobre o sistema radicular das plantas com observações *in situ* no campo para o manejo das lavouras.

O desenvolvimento de um método de avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar, que apresente relativa facilidade operacional em campo e proporcione resultados confiáveis, torna-se interessante para aumentar o número de trabalhos que estudem o sistema radicular dessa cultura em campo.

O conhecimento do sistema radicular da cana-de-açúcar permite a utilização racional das técnicas agronômicas, tais como o sistema e o espaçamento de plantio, a aplicação dos fertilizantes, as operações de cultivo, a drenagem dos solos e os sistemas de irrigação, o controle da erosão, o uso de culturas intercalares entre outros (CASAGRANDE, 1991).

Muitos experimentos com adubação nitrogenada em cana-de-açúcar foram realizados e se restringiram em avaliar os efeitos no crescimento da parte aérea da cultura, não levando em consideração que a cana-de-açúcar é uma cultura semi-

perene, que depende das reservas contidas no sistema radicular para a rebrota da cultura no ciclo agrícola subsequente.

Poucos trabalhos avaliaram os efeitos da fertilização nitrogenada no crescimento, distribuição, acúmulo de nutrientes e capacidade do sistema radicular em suprir a parte aérea com água e nutrientes. Nesse contexto, merecem destaque os trabalhos desenvolvidos no Brasil em condições de campo (SAMPAIO; SALCEDO; CAVALCANTI, 1987; VITTI et al., 2007) e vaso (TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2006; FRANCO et al., 2007), que também estudaram os efeitos da fertilização nitrogenada na dinâmica de desenvolvimento de raízes da cana-de-açúcar. Outros trabalhos também merecem destaque, evidenciando o aumento do interesse dos pesquisadores em estudar o sistema radicular da cana-de-açúcar, envolvendo diversas variáveis (FARONI et al., 2007; FARONI; TRIVELIN, 2006; FARONI, 2004; PAULINO et al., 2004; VASCONCELOS et al., 2003; VASCONCELOS, 2002; ALVAREZ et al., 2000; BALL-COELHO et al., 1992).

Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) constataram aumento na massa de raízes com a aplicação de 60 kg ha^{-1} de N no plantio em comparação à testemunha nas condições do nordeste brasileiro, porém sem evidenciar aumento na produtividade de colmos da cana-planta. Recentemente, trabalhos desenvolvidos em condições de vaso constataram maior crescimento de raízes e maior acúmulo de N no sistema radicular e na parte aérea em função das doses de N de plantio (TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2006), assim como maior acúmulo de macronutrientes no sistema radicular (FRANCO et al., 2007). Vitti et al. (2007) constataram maior crescimento de raízes e maior produtividade de colmos em uma 2ª soca em função de doses de N aplicadas no início do ciclo agrícola, e o efeito das doses se mantiveram até a 3ª soca, mesmo tendo sido aplicada dose única de N após o corte da 2ª soca. Os autores atribuíram esse efeito residual à maior reserva de N e S no sistema radicular no final do ciclo da 2ª soca, proporcionado pela adubação realizada no início do ciclo.

Portanto, há evidências de que a adubação nitrogenada favorece o crescimento de raízes e a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, promovendo maior produtividade de colmos, que pode ainda se estender para os próximos ciclos devido ao

melhor desenvolvimento do sistema radicular. Por outro lado, esses aspectos não foram suficientemente estudados em condições de campo.

Sendo assim, objetivou-se com o trabalho desenvolver um método de amostragem de raízes de cana-de-açúcar por meio de sondagem e avaliar, em função de doses de nitrogênio, (i) a distribuição do sistema radicular da cana-planta; (ii) o crescimento e acúmulo de nitrogênio no sistema radicular e parte aérea durante o ciclo da cana-planta e (iii) a massa do sistema radicular (raízes e rizomas) e sua influência na produtividade de colmos e açúcar no 1º e 2º corte.

Referências

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C.; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e cana queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamic in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.

BOLOGNA-CAMPBELL, I.R. **Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

FARONI, C.E. **Sistema radicular da cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 68 p. Dissertação (Mestrado em Solos e nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O.; SILVA, P.H.; BOLOGNA, I.R.; VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J. Marcação de fitomassa de cana-de-açúcar com aplicação de solução de uréia marcada com ¹⁵N. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 851-857, 2007.

FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 521-526, 2007.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, M.C.B.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A.; MURATA, I.M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 911-917, 2004.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III: conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 25-431, 1987.

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.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 849-858, 2003.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita**: crua mecanizada e queimada manual. 140 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2002.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J.F. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

ZONTA, E.; BRASIL, F.C.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed) **Nutrição mineral das plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

2 DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR AVALIADA POR DOIS MÉTODOS: MONÓLITO E SONDA

Resumo

Poucos estudos com cana-de-açúcar avaliaram o sistema radicular da cultura, apesar da sua importância para explicar os efeitos que ocorrem na parte aérea da planta. Esse fato é devido, em grande parte, à dificuldade de avaliação do sistema radicular e à elevada variabilidade dos resultados. Objetivou-se com o trabalho desenvolver um método de avaliação do sistema radicular da cana, por meio de sondagem a fim de se avaliar a massa, distribuição e raízes metabolicamente ativas em função da adubação nitrogenada de plantio. Para tanto foi desenvolvido experimento em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico textura média, em Jaboticabal/SP, no esquema de blocos ao acaso com quatro repetições, contendo quatro tratamentos: controle (sem N), 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ N-uréia aplicado no sulco de plantio, com a cultivar SP81 3250. Uma semana antes da colheita foi aplicada solução de uréia-¹⁵N na base de colmos das plantas de cana-de-açúcar, para marcação do sistema radicular com metabolismo ativo. Foram abertas trincheiras, de 1,5 m de largura e 0,6 m de profundidade, entre duas linhas de cana para permitir a amostragem de raízes por dois métodos: monólitos (0,3; 0,2 e 0,15 m de largura, profundidade e comprimento, respectivamente) retirados da parede da trincheira e sonda (0,055 m de diâmetro interno). Para cada método foram coletadas 15 amostras por parcela. As amostras foram peneiradas (malha de 2 mm), secas em estufa e obtida a massa seca. A amostragem de raízes com sonda resultou em massa de raízes que não diferiu da avaliação em monólito, indicando que esse método pode ser usado para avaliações da massa de raízes de cana-de-açúcar; porém não foi eficiente em avaliar tanto a distribuição das raízes no perfil do solo quanto a massa de rizomas, devido ao pequeno volume amostrado. A adubação nitrogenada de plantio não promoveu maior acúmulo de raízes na cana-planta, porém causou mudanças na distribuição do sistema radicular no solo. A ausência da adubação nitrogenada promoveu melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo, com 50, 34 e 16% nas camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m, respectivamente; nos tratamentos fertilizados as raízes se concentraram na camada superficial, com 70, 17 e 13% para as mesmas camadas. As raízes metabolicamente ativas concentraram-se no centro da touceira, totalizando 40% da massa total de raízes, independentemente da fertilização nitrogenada (sem N ou 120 kg ha⁻¹ N). A produtividade de colmos para os tratamentos controle, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N foi de 145, 143, 146 e 147 t ha⁻¹, respectivamente, indicando não ter ocorrido influência da fertilização nitrogenada; entretanto, o conteúdo de pol na cana foi afetado pela fertilização nitrogenada, indicado pelos teores de 15,6; 16,9; 16,8 e 15,8%, respectivamente para os mesmos tratamentos, resultando em efeito de regressão quadrático.

Palavras-chave: Nitrogênio; Raízes ativas; Métodos; Distribuição de raízes

Root system distribution of sugarcane evaluated by two methods: monolith and probe

Abstract

Few studies have evaluated the root system of the sugarcane crop, in spite of its importance to explain shoot growth. This is due mostly to the difficulty in evaluating the root system and the high variability in the results. The objective of this work was to develop a method using a probe to collect root material used to determine mass, distribution and metabolic activity of the root system to evaluate the effect of nitrogen applied to the cane-plant. For this purpose an experiment was conducted in a randomized block design in an Arenic Kandiusults soil in Jaboticabal, State of São Paulo, Brazil, with four treatments (four replications): control (without nitrogen), 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ N-urea applied in the furrow at planting, using the cultivar SP81 3250. A week prior to harvest solution of urea-¹⁵N was injected at the sugarcane stalk base to identify the root system with active metabolism. Trenches 1.5 m wide and 0.6 m deep were opened between rows to allow sampling the root system by two methods: a monolith (0.3; 0.2 and 0.15 m of width, depth and length, respectively) taken from trench wall and a core (soil and roots) collected with a stainless steel probe (0.055 m of internal diameter). For each method 15 samples were gathered per plot. Samples were sieved (2 mm), and the oven-dried weight obtained. Mass of roots obtained with the probe sampling did not differ from that of the monolith evaluation, indicating that this method can be used for the evaluation of sugarcane roots mass; however it was not efficient for the evaluation of root distribution in the soil profile nor for the rhizome, due to the small volume sampled. Nitrogen fertilizer applied at planting did not result in a higher amount of roots of the cane-plant but it caused changes in the distribution of the root system in the soil profile. The lack of nitrogen fertilization resulted in better distribution of the root system in the soil, with 50%, 34% and 16% in the layers of 0.0 m to 0.2 m, 0.2 m to 0.4 m and 0.4 m to 0.6 m, respectively, while averaged results for the rates of applied nitrogen were 70, 17 and 13% in the same layers. The metabolic active roots were concentrated close to the center of the stool, totaling 40% of the root weight, regardless of the amount of nitrogen fertilizer applied at planting (without N or 120 kg ha⁻¹ N). Stalk yield for treatments control and 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ of N was 145, 143, 146 and 147 t ha⁻¹, respectively, indicating that nitrogen fertilization applied at planting had no influence; nevertheless, sucrose content was affected by N-fertilization as indicated by the values of 15.6; 16.9; 16.8 e 15.8%, respectively, for the same treatments, resulting in a quadratic regression effect.

Keywords: Nitrogen; Active roots; Methods; Root distribution

2.1 Introdução

2.1.1 A carência de pesquisas sobre o sistema radicular

Durante muitos anos (até meados do século passado), as raízes foram consideradas a “metade oculta” dos vegetais (WASEL et al., 2002, apud ZONTA et al., 2006), com significativa escassez de resultados de pesquisa nesse tema em todo o mundo. As razões para essa carência de dados são historicamente explicáveis pelas dificuldades metodológicas, pela própria inacessibilidade ao sistema radicular como objeto de experimentação, pela sua complexidade tridimensional e por sua marcada variabilidade espacial e temporal (NOORDWIJK, 1993, apud ZONTA et al., 2006). Durante muitos anos, o tempo gasto nas atividades de quantificação do sistema radicular e as incertezas quanto aos resultados constituíram fortes desestímulos ao trabalho com raízes (ZONTA et al., 2006).

Atualmente existe consenso acerca da importância de estudos com observações *in situ* no campo para o manejo das lavouras. Quando associado aos fatores edafoclimáticos, eles são fundamentais para otimização das práticas de adubação, tratamentos culturais, densidade de plantio, irrigação, cultivos intercalares, entre outros (ZONTA et al., 2006). Ainda segundo esses autores, os estudos das raízes são fundamentais para o entendimento das relações de absorção de água e nutrientes pela cultura.

Um dos fatores de maior importância na relação planta-água-solo é a arquitetura e distribuição do sistema radicular das plantas, bem como sua dinâmica de crescimento (VASCONCELOS, 2002). O conhecimento do sistema radicular da cana-de-açúcar permite a utilização adequada das técnicas agrônômicas, tais como: espaçamento, local de aplicação dos fertilizantes, operações de cultivo, drenagem dos solos e sistemas de irrigação, controle da erosão, uso de culturas intercalares entre outras (CASAGRANDE, 1991). Entretanto, o estudo de sistema radicular é muito trabalhoso e, além disso, a variabilidade das condições físicas, químicas e biológicas do solo tem influência na distribuição das raízes e pode levar a resultados que não representam a realidade. Assim, seria interessante determinar uma forma de estudo capaz de amostrar

as raízes com um mínimo de gasto de tempo e de trabalho, e com o máximo de exatidão e precisão possíveis (VASCONCELOS et al., 2003).

2.1.2 Métodos de avaliação do sistema radicular

Os principais métodos de avaliação do sistema radicular das plantas são: os métodos da escavação, do monólito, do trado, do perfil, do tubo ou paredes de vidro e métodos indiretos, conforme Bohm (1979), que descreve detalhadamente cada método. No Brasil, Crestana et al. (1994) uniram a técnica de imagens digitais ao método do perfil com quantificação de comprimento de raízes.

A escolha do método de avaliação do sistema radicular irá depender da cultura, das condições edáficas, da possibilidade ou não de amostragens destrutivas, da disponibilidade de mão de obra e, principalmente, dos objetivos do estudo.

Em relação às características radiculares que podem ser mensuradas, pode-se obter o comprimento radicular (m ou km de raízes), que determina o potencial de absorção de água e nutrientes do solo; a massa radicular (g ou kg) que determina o estoque total de matéria subterrânea e nutriente alocados; o volume radicular (cm^3 ou m^3) que determina o volume de solo explorado pelas raízes; a área radicular (cm^2 ou m^2) que determina a absorção de água e nutrientes do solo e o diâmetro radicular (mm), em estudos com associação com microrganismos, regulação do estresse hídrico e indicador da influência e resposta das condições químicas e físicas do solo (ATKINSON, 2000, apud ZONTA et al., 2006).

Köpke (1981) avaliou a distribuição de raízes utilizando os métodos do monólito, do trado, do perfil e do tubo ou “rizotron”, encontrando a maior densidade de raiz-comprimento (em raiz cm^{-3} de solo) pelo método do monólito, que foi considerado padrão em estudos sobre o sistema radicular. O autor considera que a distribuição de raízes pode ser estimada com todos os métodos em relação ao tempo, profundidade e, por exemplo, o efeito do cultivo, porém todos permitem obter somente determinações aproximadas da densidade de raízes absoluta. O método do perfil, constituído da lavagem de uma camada de 5 mm de espessura das paredes do perfil do solo e estimando o comprimento médio das raízes expostas, apresentou a relação mais

favorável entre o esforço gasto e a informação obtida, porém, como esse método subestima a densidade de raiz comparada ao método padrão, os dados tiveram que ser multiplicados pelo fator 2,06. Segundo o autor, o método do trado exigiu muito pouco trabalho, sugerindo que mais estudos devessem ser realizados visando avaliar melhor esse método.

Faroni (2004) constatou que o método da sonda amostradora de raízes, coletando seis subamostras por local, se equiparou ao método do monólito em trincheira para quantificação do sistema radicular total na maioria das profundidades estudadas. Entretanto, Vasconcelos et al. (2003) verificou que o método do trado, com duas subamostras, superestimou a quantidade de raízes. Isso indica que, para uso de técnicas que avaliam um pequeno volume de solo, torna-se necessário maior número de subamostras para avaliar a distribuição do sistema radicular no perfil do solo, visando obter resultados mais próximos da realidade.

O desenvolvimento de um método de avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar que apresente relativa facilidade operacional em campo e proporcione resultados confiáveis torna-se interessante para aumentar o número de trabalhos com sistema radicular dessa cultura em experimentos de campo.

O desenvolvimento do sistema radicular de culturas perenes e semi-perenes, como a cana-de-açúcar, apresenta um agravante, no que se refere à renovação de raízes entre ciclos agrícolas (anos-safras) ou no mesmo ano, tornando-se necessário a identificação de raízes vivas ou metabolicamente ativas em uma massa total amostrada (FARONI, 2004). O método da diluição isotópica com ^{15}N possibilitou avaliar a massa de raízes com metabolismo ativo e sua distribuição no solo (FARONI; TRIVELIN, 2006).

O objetivo desse trabalho foi comparar dois métodos de avaliação do sistema radicular, por meio de sondagem e retirada de monólitos, assim como a distribuição do sistema radicular e raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar, em função de doses de nitrogênio aplicadas no sulco de plantio.

2.2 Material e métodos

O estudo foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar na Usina Santa Adélia, no município de Jaboticabal/SP. A área experimental situa-se na latitude Sul de 21°19'98", longitude Oeste de 48°19'03" e altitude predominante de 600 m.

A cultivar utilizada foi a SP81 3250. O plantio foi realizado em abril de 2005 e a colheita em julho de 2006, completando um ciclo agrícola de 15 meses. Antes do plantio, em janeiro de 2006, foi aplicado 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, seguido de aração e gradagens. A sulcação foi realizada em uma profundidade de 0,35 m, no espaçamento de 1,5 m, concomitante à aplicação de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e K₂O, com as fontes Superfosfato Triplo e Cloreto de Potássio, respectivamente. Foram utilizadas 15 gemas viáveis por metro e realizada a aplicação de inseticida e nematicida sobre as mudas, seguido da cobertura das mudas com uma camada de cerca de 0,1 m de solo.

O delineamento experimental foi o de blocos completos ao acaso, com quatro tratamentos, correspondente às doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N-uréia aplicado no sulco, e uma testemunha (sem N mineral), com quatro repetições.

2.2.1 Caracterização do solo

O solo da área experimental é um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd) (EMBRAPA, 1999). A caracterização química e física do solo em várias profundidades (Tabela 1) foi realizada tomando-se amostras em trincheira aberta na área de bordadura dos experimentos. Foram coletadas amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo e também para análise química (RAIJ et al., 2001) e granulométrica pelo método da pipeta (GEE; OR, 2002).

Tabela 1 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (Arenic Kandiusults). Jaboticabal/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			mmol _c kg ⁻¹				%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,15 m)	5,6	23	10	3,6	18	13	0	17	51,6	67	285	1305
A ₂ (0,37 m)	4,7	16	11	2,2	9	5	2	18	34,2	47	296	1460
AB (0,56 m)	4,1	11	3	1,2	2	1	8	31	35,2	12	347	1391
BW ₁ (0,96 m)	4,4	8	1	0,9	3	1	3	20	24,9	20	371	1208
BW ₂ (0,96+)	5,1	7	1	3,5	2	1	0	9	15,5	42	367	1244

* ρ = densidade do solo

2.2.2 Avaliação do sistema radicular

Tendo em vista a necessidade de avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar durante o ciclo da cultura, foi utilizado um método não destrutivo de amostragem, utilizando sonda da SONDATERRA® com 0,055 m de diâmetro interno. Porém, levantou-se a questão: o método da sonda se equipara ao método padrão de amostragem de raiz por monólitos retirados da parede de trincheiras? Nesse sentido, foi realizado estudo comparativo, na colheita da cana-planta em julho de 2006, da avaliação da massa de raízes pelo do método da sonda e pelo do método do monólito retirado da parede da trincheira.

Monólito

Foram abertas trincheiras com as dimensões de 1,5 m de largura (de linha a linha de cana), 1 m de comprimento (de tal forma a permitir a entrada de uma pessoa na trincheira) e 0,6 m de profundidade. Da parede das trincheiras foram retirados monólitos de solo mais raízes, com 0,15 m de espessura. Foram retirados por profundidade: 0-0,2; 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m, 5 monólitos com as dimensões de 0,3 x 0,15 m, com auxílio de pá reta e de um molde (quadro reticulado para auxiliar na visualização das dimensões do monólito). Foram avaliadas 3 camadas de solo, de 0 a

0,2 m, 0,2 a 0,4 m e 0,4 a 0,6 m. Portanto, em uma parede da trincheira foram retirados 15 monólitos com volume de 9 dm^3 cada, totalizando 135 dm^3 por trincheira.

Após a retirada dos monólitos, as amostras foram acondicionadas em saco plástico. No campo, para separação das raízes e rizomas do solo, foram utilizadas peneiras com malha de 2 mm, separando-se as raízes e rizomas, os quais foram acondicionados em saco plástico. No laboratório, procedeu-se a lavagem das raízes e rizoma em água corrente, sobre peneiras com malha de 1 mm. As amostras foram secas em estufa a 65°C durante 48 h, até obtenção de massa constante, sendo posteriormente obtida a massa de matéria seca de raízes e rizoma em balança analítica com precisão de 0,01 g.

Com os dados de massa de raízes e rizomas secos de cada monólito (g) e o volume amostrado em cada local (9 dm^3), obteve-se a massa de raízes em g dm^{-3} , unidade usual para estudos envolvendo o sistema radicular.

Sonda

Foram utilizadas sondas em aço inox com 1,2 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno. Foi retirada uma amostra com sonda correspondente à posição e profundidade de cada monólito, distante cerca de 0,10 m do local de onde foram retirados os monólitos (o mais próximo possível, sem causar o desmoronamento) (Figura 1). O volume de solo mais raízes amostrado em cada sondagem, na profundidade de 0,2 m foi de $0,475 \text{ dm}^3$, totalizando $7,13 \text{ dm}^3$ nos 15 pontos amostrados em cada trincheira. O volume de solo mais raízes amostrado pela sonda representou, portanto, 5,3 % do volume amostrado pelos monólitos, ou seja, um volume cerca de 20 vezes menor.

Figura 1 - Esquema de amostragem do sistema radicular por meio de sondagem e monólitos retirados da parede da trincheira

Os procedimentos de peneiramento e processamento das amostras, tanto no campo (malha de 2 mm) como em laboratório (malha de 1 mm) e obtenção da massa de matéria seca foram os mesmos já citados no método do monólito.

A massa de raízes secas por hectare foi calculada separadamente para cada seção do perfil do solo, representada por um (1) monólito. Os cálculos foram os seguintes:

$$MSR = [(dr \times Vs) \times 1.000]$$

Onde:

MSR = massa de raiz seca, em kg ha⁻¹;

dr = densidade de raiz (g dm⁻³) para cada um dos 15 pontos amostrados, obtida por (1);

Vs = volume de solo representado por cada um dos 15 pontos amostrados, em dm³ ha⁻¹, obtida por (2).

$$(1) dr = MR/Va$$

Onde:

MR = massa de raiz seca obtida pelo método do monólito ou da sonda, em cada um dos 15 pontos amostrados, em g;

Va = volume amostrado em cada um dos 15 pontos, de 9 dm³ para o monólito e 0,475 dm³ para sonda.

$$(2) Vs = [0,3 m_{largura} \times 0,2 m_{profund} \times (10.000/1,5) \times 1.000]$$

Para o cálculo da massa de raízes seca na camada de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m foram somadas as massas de raízes dos 5 pontos que representaram aquela camada. Para o cálculo da massa de raízes seca total, até 0,6 m, foram somadas as massas de todos os 15 pontos amostrados.

2.2.3 Raízes metabolicamente ativas

Os tratamentos testemunha (sem N mineral) e 120 kg ha⁻¹ de N-Uréia, com quatro repetições cada, foram escolhidos para o estudo de raízes metabolicamente ativas, segundo método descrito por Faroni (2004) e Faroni e Trivelin (2007).

Os locais escolhidos para aplicação da solução de uréia enriquecida com ¹⁵N e para amostragem do sistema radicular foram os locais onde seriam abertas as trincheiras em que foi realizado o estudo comparativo dos métodos de amostragem de raízes, descritos anteriormente. Cada parcela foi constituída de dois segmentos de linha com 1,5 m cada, totalizando três metros por parcela.

A fonte utilizada com o marcador isotópico ¹⁵N foi a uréia com abundância de 91,05% em átomos de ¹⁵N, fornecida em 40 mL de solução na concentração de 22,6% (m/v). Essa quantidade foi necessária para marcar a cana-de-açúcar com ¹⁵N (parte aérea e sistema radicular), de modo a atingir enriquecimento de 0,7% de átomos de ¹⁵N, teor satisfatório para possibilitar a realização do estudo. As parcelas foram estaqueadas, retirou-se a palha da cana e procedeu-se a contagem do número de

perfilhos na parcela. No dia 5 de julho de 2006 a solução de uréia foi aplicada por meio de injeção na base do colmo (Figura 2 a e b), utilizando seringa com capacidade de 1 mL, agulha com 0,55 mm de espessura e 20 mm de comprimento, tomando-se o cuidado para a solução não retornar pelo orifício da agulha. Esse procedimento teve por base os resultados de Faroni et al. (2007), comparando métodos de marcação de biomassa de cana-de-açúcar.

Após 7 dias da aplicação da solução nitrogenada- ^{15}N (12/07/2007), tempo suficiente para a translocação de nitrogênio pela planta, inclusive ao sistema radicular, foi realizada amostragem da parte aérea e do sistema radicular.

As amostras coletadas por meio da sondagem foram acondicionadas em sacos plásticos e fechadas, para manutenção da umidade. Em laboratório, as amostras de solo mais raízes foram pesadas, sendo posteriormente retirada uma subamostra de solo para determinação da umidade. O peneiramento foi realizado em peneira com malha de 2 mm, sendo coletado uma subamostra do solo mais resíduo de raízes que passaram no peneiramento, para posterior análise do teor de N e ^{15}N .

A **b**

Figura 2. a e b) Aplicação de solução de uréia- ^{15}N na base dos colmos

No campo, no momento da retirada dos monólitos, foram coletadas amostras de raízes vivas segundo Faroni (2004), que foram consideradas padrão no estudo das raízes metabolicamente ativas. De cada local amostrado nas trincheiras, foram selecionadas raízes mais “tenras”, com maior número de ramificações e com coloração clara, que foram consideradas padrões de raízes metabolicamente ativas.

As amostras de raízes, raiz viva e solo com resíduo de raízes foram secas em estufa a 65° C durante 48 h e posteriormente obtida a massa seca em balança analítica (precisão de 0,01 g). As amostras de raízes e raiz viva foram passadas em moinho de facas tipo Wiley, tomando-se o cuidado para não ocorrer a contaminação entre as amostras. As amostras de solo com resíduos de raízes foram passadas em moinho de bolas para melhor homogeneização. As subamostras de solo foram secas em estufa a 105° C durante 48 h para determinação da umidade.

As determinações do teor de N e abundância de ^{15}N foram realizadas no CENA/USP, em espectrômetro de massas automatizado modelo ANCA-GSL, da SERCON Co., UK (BARRIE; PROSSER, 1996).

Para o cálculo da massa de raízes metabolicamente ativas de cada amostra foram utilizadas as abundâncias isotópicas, as massas e os teores de N das amostras de raízes, raiz viva e solo mais resíduo de raízes. Os cálculos utilizados foram os descritos por Faroni e Trivelin (2007), como segue:

$$\text{MSRVA} = \{[(\%^{15}\text{N}_{\text{exc. amostra}})/(\%^{15}\text{N}_{\text{exc. raiz viva}})] \cdot M_{\text{amostra}} \cdot \%N_{\text{amostra}}\} / \%N_{\text{raiz viva}}$$

Onde:

MSRVA = massa seca de raízes vivas da amostra, em mg;

$\%^{15}\text{N}_{\text{exc. amostra}}$ = porcentagem de átomos de ^{15}N em excesso na amostra;

$\%^{15}\text{N}_{\text{exc. raiz viva}}$ = porcentagem de átomos de ^{15}N em excesso na raiz viva;

$\%N_{\text{raiz viva}}$ = teor de nitrogênio na raiz viva.

2.2.4 Análise estatística

Na comparação da massa de raízes secas por hectare pelos dois métodos e em função das doses de nitrogênio, procedeu-se análise de variância como parcela subdividida, sendo as parcelas as doses de nitrogênio e as subparcelas os métodos de avaliação. Também foram elaborados gráficos com a média dos resultados e o respectivo desvio padrão da média, para comparação dos métodos em função das doses de N.

No estudo da distribuição do sistema radicular em função da adubação nitrogenada de plantio, procedeu-se a análise de variância como parcela subdividida, sendo as parcelas as doses de nitrogênio e as subparcelas as profundidades, isoladamente para cada método de avaliação. Quando o valor do Teste F foi significativo, aplicou-se o teste de Tukey para verificar diferenças entre a distribuição de raízes nas camadas de solo e doses de N.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Massa total de raízes em função dos métodos de avaliação

Não se constatou diferença significativa na massa de raízes secas entre o método da sonda e do monólito, independentemente da dose de nitrogênio (Tabela 2 e Figura 2). Faroni (2004) constatou diferença significativa na densidade de raízes na colheita entre os métodos do monólito e da sonda, com valores da ordem de 0,52 e 1,08 g dm⁻³, respectivamente. Segundo o mesmo autor, na média de quatro épocas de amostragem, os métodos se correlacionaram para as profundidades de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,6 a 0,8 m, embora a sonda tenha superestimado os resultados de densidade de raízes. O autor associou a não existência de diferença entre os métodos aos elevados desvios dos resultados nos dois métodos.

Na colheita, a massa de raízes secas não foi influenciada pelas doses de nitrogênio aplicadas no plantio (Tabela 2).

Tabela 2 – Massa de raízes secas de cana-de-açúcar (até 0,6 m) por dois métodos de avaliação, em função da fertilização nitrogenada de plantio

Dose de N kg ha ⁻¹	Sonda	Métodos	
		kg ha ⁻¹	Monólito
0	2.313 (0,39) a A		2.478 (0,41) a A
40	2.266 (0,38) a A		2.857 (0,48) a A
80	2.253 (0,38) a A		2.017 (0,34) a A
120	1.920 (0,32) a A		2.168 (0,36) a A
Média	2.188 (0,36) A		2.347 (0,40) A
CV	32,8		37,3

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas e letras maiúsculas iguais nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os números entre parênteses representam a densidade de raízes, em g dm⁻³

Drew (1975) evidenciou aumento significativo da ramificação de raízes de cevada causada pelo fornecimento de nitrogênio em solução nutritiva em partes específicas do sistema radicular, tanto para a fonte amônio quanto para nitrato. Efeito semelhante ocorreu para o fósforo, enquanto o fornecimento ou não do potássio não promoveu mudanças na arquitetura radicular. Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) evidenciaram efeito significativo da fertilização nitrogenada de plantio na massa de raízes de cana-de-açúcar na ocasião da colheita, encontrando 1.700 kg ha⁻¹ de raiz na testemunha (sem N) e 2.250 kg ha⁻¹ na dose de 60 kg ha⁻¹ de N.

A densidade de raízes encontrada no presente estudo foi ligeiramente inferior aos dados encontrados na literatura. Na colheita da cana planta, na média das doses de nitrogênio e métodos de avaliação, a densidade foi de 0,38 g dm⁻³ ou 2.270 kg ha⁻¹, considerando raízes vivas e mortas e sem considerar rizomas, até 0,6 m de profundidade. Ball-Coelho et al. (1992) constatou densidade de raízes na colheita da cana planta de 0,75 g dm⁻³ e na soqueira de 0,9 a 1,10 g dm⁻³, em um Argissolo no Nordeste do Brasil, trabalhando até 2,0 m de profundidade, sendo a maior densidade encontrada, muito provavelmente, ao maior volume de solo amostrado. Vasconcelos et al (2003), trabalhando até a profundidade de 0,8 m, encontrou, em soqueira de quinto corte, densidade de raízes variando de 0,63 e 0,76 g dm⁻³, em solo com textura semelhante, porém álico. Faroni (2004), trabalhando até 0,8 m de profundidade, evidenciou, na colheita do terceiro corte da cultivar RB85 5156 e com o método do

monólito, densidade de raízes de $0,52 \text{ g dm}^{-3}$ em um Latossolo Vermelho distrófico de textura arenosa. As maiores densidades de raízes encontradas nesses trabalhos foram devidas provavelmente às maiores profundidades e, no caso das soqueiras, ao acúmulo da massa total de raízes na medida em que os cortes da cana vão sendo realizados, além de outros fatores relacionados ao desenvolvimento radicular.

Considerando-se os desvios padrão das médias de cada tratamento observa-se que os métodos são similares, independentemente da grandeza dos valores médios (Figura 2).

Deve-se ressaltar que no estudo somente foi comparado a massa de raízes, descartando-se os dados de rizoma, semelhante ao trabalho realizado por Vasconcelos et al. (2003). O método da sonda não permitiu estimar a massa de rizomas da cana-de-açúcar, portanto as comparações com o método do monólito não foram realizadas para esse compartimento da planta.

Figura 2 - Massa de raízes secas por dois métodos de avaliação do sistema radicular, em função da fertilização nitrogenada de plantio. As barras representam o desvio padrão da média para $n=4$

Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) evidenciaram maior massa de colmos subterrâneos ($3,6 \text{ t ha}^{-1}$) que de raízes ($1,7 \text{ t ha}^{-1}$ na testemunha e $2,25 \text{ t ha}^{-1}$ na dose de 60 kg ha^{-1} de N) na colheita, enquanto Faroni (2004) encontrou, na média de quatro épocas de avaliação em cana soca, $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ de raízes e $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ de rizomas, evidenciando a importância da quantificação dessa parte do sistema radicular em estudos com cana-de-açúcar, por tratar-se de fonte de reserva nutricional para a cultura.

O método da sonda para avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar pode, portanto, ser utilizado em estudos da massa total de raízes secas no perfil do solo, com vantagens no que diz respeito à facilidade e rapidez das avaliações quando comparado ao método do monólito. Entretanto, se for necessária a quantificação dos rizomas, deve-se dar preferência aos métodos que explorem maior volume de solo, como trincheiras abertas na projeção da linha (por exemplo, coletando-se toda massa de rizomas em 1 ou 2 metros na linha da cana). O método da sonda não permitiu estimar a massa de rizomas na cultura da cana-de-açúcar, devido ao pequeno volume amostrado pelo equipamento.

2.3.2 Distribuição do sistema radicular em função dos métodos de avaliação

Pelo método do monólito, na média dos tratamentos 65, 22 e 13% das raízes encontram-se na camada de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m e de 0,4 a 0,6 m de profundidade, respectivamente (Tabela 3). Pelo método da sonda, a distribuição foi de 52, 28 e 20% nas mesmas camadas. Enquanto o método do monólito evidenciou maior massa de raízes na camada de 0 a 0,2 m para a dose de 40 kg ha^{-1} de N comparado à testemunha (sem N) e à dose de 120 kg ha^{-1} de N, no método da sonda não foi encontrada diferença na massa de raízes com a dose de nitrogênio em nenhuma camada do solo. Esse fato pode ser devido ao menor volume da sonda comparado ao do monólito, que não consegue identificar diferenças pequenas na massa de raízes entre tratamentos.

Tabela 3 - Distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar no perfil do solo por dois métodos de avaliação, em função da fertilização nitrogenada de plantio

Prof m	Dose de N (kg ha ⁻¹)								Média	
	0		40		80		120			
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%
monólito										
0-0,2	1.247 a B	(50)	2.230 a A	(78)	1.414 a AB	(70)	1.291 a B	(60)	1.545 a	(65)
0,2-0,4	847 ab A	(34)	346 b A	(12)	328 b A	(16)	531 ab A	(24)	513 b	(22)
0,4-0,6	384 b A	(16)	281 b A	(10)	275 b A	(14)	346 b A	(16)	322 b	(13)
Total	2.478 A		2.857 A		2.017 A		2.168 A			
sonda										
0-0,2	1.136 a A	(49)	1.193 a A	(53)	1.237 a A	(55)	1.005 a A	(52)	1.143 a	(52)
0,2-0,4	697 ab A	(30)	671 ab A	(30)	580 b A	(26)	517 ab A	(27)	616 b	(28)
0,4-0,6	481 b A	(21)	401 b A	(18)	438 b A	(19)	399 b A	(21)	439 b	(20)
Total	2.313 A		2.266 A		2.255 A		1.920 A			

Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre profundidades e letras maiúsculas iguais entre doses de nitrogênio, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Os números entre parênteses representam o percentual de raízes em cada profundidade

Portanto, para estudos mais detalhados, que exigem maior grau de exatidão, como a distribuição do sistema radicular no solo, o método da sonda pode não ser adequado, podendo resultar em conclusões equivocadas. Nesses casos, recomenda-se utilizar o método do monólito, considerado o método padrão de amostragem do sistema radicular (KOPKE, 1981).

2.3.3 Distribuição do sistema radicular em função da fertilização nitrogenada

A densidade de raízes decresceu exponencialmente com a profundidade e em direção à entrelinha da cultura, independentemente da fertilização nitrogenada. Nas camadas mais superficiais e próximas do centro da touceira foram encontradas as maiores densidades de raízes, demonstrando uma concentração do sistema radicular nesse local. A densidade geral de raízes foi semelhante nos tratamentos, de 0,41 g dm⁻³ na testemunha e 0,39 g dm⁻³ nos tratamentos que receberam o fertilizante nitrogenado, na média das três doses de nitrogênio (Tabela 4).

Tabela 4 - Densidade de raízes em função da profundidade e distância da touceira de cana-de-açúcar, no tratamento sem N mineral (testemunha) e com N mineral (média das 3 doses de N)

Prof m	Distância da linha de cana (m)					Média
	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,75	0,3-0,6	0-0,3	
Sem N mineral						
0-0,2	1,71	0,33	0,18	0,22	0,68	0,62
0,2-0,4	0,84	0,12	0,06	0,07	1,02	0,42
0,4-0,6	0,23	0,09	0,06	0,09	0,48	0,19
Média	0,93	0,18	0,10	0,13	0,73	0,41
Com N mineral						
0-0,2	1,83	0,21	0,22	0,22	1,63	0,82
0,2-0,4	0,41	0,08	0,06	0,08	0,38	0,20
0,4-0,6	0,23	0,07	0,07	0,06	0,32	0,15
Média	0,82	0,12	0,12	0,12	0,78	0,39

Em relação à distribuição horizontal das raízes no solo, no tratamento sem N mineral a densidade de raízes foi de 0,62 g dm⁻³ na camada de 0 a 0,2 m, 0,42 g dm⁻³ na de 0,2 a 0,4 m e de 0,19 g dm⁻³ na de 0,4 a 0,6 m. Nos tratamentos que receberam o fertilizante nitrogenado, a densidade foi de 0,82, 0,20 e 0,15 g dm⁻³ para as camadas de 0 a 0,2, 0,2 a 0,4 e 0,4 a 0,6 m, respectivamente, evidenciando uma maior densidade na camada superficial e menor nas camadas mais profundas em relação à testemunha (Tabela 4). Não foi evidenciado mudanças na distribuição vertical das raízes nas camadas de solo com os tratamentos.

A fertilização nitrogenada de plantio causou mudanças na distribuição da massa total de raízes da cana-de-açúcar. De maneira geral, a fertilização nitrogenada promoveu maior crescimento de raízes na camada superficial e diminuiu seu crescimento em profundidade (Tabela 5). No tratamento sem N mineral (testemunha), 50% das raízes foram encontradas na camada de 0 a 0,2 m, 34% na de 0,2 a 0,4 e 15% na de 0,4 a 0,6 m. Com a fertilização nitrogenada, cerca de 70% das raízes se concentraram na camada de 0 a 0,2 m, 17% na de 0,2 a 0,4 m e 13 % na camada de 0,4 a 0,6 m, na média das doses de N.

Tabela 5 - Massa total de raízes seca (kg ha^{-1}) em função da profundidade e distância da touceira de cana-de-açúcar, nos tratamentos com (médias das 3 doses de N) e sem N mineral (testemunha)

Prof m	Distância da linha de cana (m)					Total
	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,75	0,3-0,6	0-0,3	
Sem N mineral						
0-0,2	682 (28*)	132 (5)	73 (3)	88 (4)	271 (11)	1.247 (50)
0,2-0,4	338 (14)	46 (2)	24 (1)	30 (1)	410 (17)	847 (34)
0,4-0,6	92 (4)	37 (2)	23 (1)	38 (2)	193 (8)	384 (15)
Total	1.113 (45)	215 (9)	120 (5)	156 (6)	874 (35)	2.477 (100)
Com N mineral						
0-0,2	731 (31)	85 (4)	86 (4)	90 (4)	653 (28)	1.645 (70)
0,2-0,4	164 (7)	31 (1)	24 (1)	32 (1)	150 (6)	402 (17)
0,4-0,6	92 (4)	29 (1)	28 (1)	24 (1)	128 (5)	301 (13)
Total	987 (42)	145 (6)	139 (6)	146 (6)	931 (40)	2.347 (100)

* os valores entre parênteses representam a percentagem de raiz em cada local

Os resultados de Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) indicaram maior massa de raízes na camada de 0,2 m de profundidade aos 3, 6 e 16 meses após o plantio no tratamento que recebeu 60 kg ha^{-1} de N em relação à testemunha, corroborando com os resultados obtidos neste estudo. Naquele estudo, a fertilização nitrogenada também favoreceu a concentração das raízes nos 0,3 m de cada lado do sulco de plantio aos 3, 6 e 11 meses em relação à testemunha, o que, entretanto, não foi verificado neste estudo (Tabela 5).

A ausência da fertilização nitrogenada de plantio favoreceu, portanto, a melhor distribuição do sistema radicular no perfil do solo. Existem duas hipóteses para explicar esse fato. A primeira seria devido à necessidade do sistema radicular explorar um maior volume de solo para absorção de nutrientes, inclusive o nitrogênio, visto que esse nutriente poderia não estar disponível próximo da zona de absorção radicular. A outra hipótese é de que os fertilizantes nitrogenados, neste caso a uréia, por apresentarem um índice salino elevado, inibem o crescimento de raízes próximo do local de aplicação, devido aos efeitos do excesso de salinidade.

Souza, Farinelli e Rosolem (2007) verificaram redução do comprimento radicular do algodão quando o fertilizante (500 kg ha^{-1} de 02-20-20) foi aplicado próximo à semente (2,5 cm de cada lado e 5 cm abaixo da semente). Também evidenciaram

redução da produção quando o fertilizante foi colocado 5 cm abaixo das sementes. Esses autores atribuíram ao efeito salino do fertilizante o menor crescimento radicular.

A abertura de sulcos no solo (sulcação) para o plantio da cana-de-açúcar é realizada a uma profundidade que varia de 0,2 a 0,3 m e os fertilizantes são aplicados nessa mesma operação, de maneira localizada, logo abaixo dos colmos-sementes. Dessa forma, o excesso de salinidade causado pelo fertilizante pode ter inibido o crescimento radicular nessa região. Observe-se que nos tratamentos que receberam a fertilização nitrogenada, a massa de raízes foi pequena na camada de 0,2 a 0,4 m (concomitante à camada que recebeu os fertilizantes), se desenvolvendo de maneira significativa no horizonte mais superficial, onde os efeitos da salinidade tendem a desaparecer. A maior concentração das raízes na camada superficial, favorecida pela fertilização nitrogenada, pode ser prejudicial ao canavial em condições de ocorrência de déficit hídrico.

Estudos a respeito da distribuição das raízes no perfil do solo podem ser úteis por uma série de motivos, como a recomendação da localização dos fertilizantes na adubação da soqueira, controle de pragas que atacam o sistema radicular, para evitar a compactação na ocasião da colheita, entre outros. Considerando-se o volume de solo explorado pelo sistema radicular em cada local ($4.000 \text{ dm}^3 \text{ ha}^{-1}$ para cada 0,2 m de profundidade) e a densidade de raízes encontrada (em g dm^{-3}), obtém-se a massa de raízes seca para cada local no perfil do solo (em kg ha^{-1}), obtida utilizando as densidades médias de raízes encontrada em todos os tratamentos. Em relação à distribuição do sistema radicular no sentido horizontal do perfil do solo, nos primeiros 0,2 m foram encontrados 65% da massa total de raízes. No sentido vertical, 81% da massa total de raízes foram encontradas no volume de solo compreendido em 0,6 m do centro da touceira (0,3 m de cada lado) e 0,6 m de profundidade (Figura 3).

Observou-se pequena quantidade de raízes na entrelinha da cultura, especialmente em profundidades maiores, quando as condições para o desenvolvimento radicular, como compactação, teor de oxigênio e nutrientes e maior acidez do solo, entre outros fatores, tornam-se limitantes.

Figura 3 - Distribuição da massa total de raízes secas de cana-de-açúcar no perfil do solo avaliada pelo método do monólito. Média de 3 doses de nitrogênio e uma testemunha. Os números entre parênteses representam a porcentagem de raiz em cada local

A heterogeneidade de distribuição do sistema radicular no perfil do solo pode estar associada a uma série de fatores. A questão da compactação do solo é um tema de relevância para a cultura da cana-de-açúcar, devido ao tráfego de máquinas pesadas na entrelinha da cultura, promovendo aumento da densidade do solo e conseqüente redução da porosidade e difusão de oxigênio.

No momento da abertura das trincheiras foi diagnosticada uma camada mais compactada entre 0,2 e 0,3 m de profundidade, causando dificuldade na abertura das mesmas pela equipe de trabalho. A densidade do solo, obtida por meio de amostras indeformadas de solo coletadas na parede das trincheiras (de onde foram retirados os monólitos), foi de 1.530 kg m^{-3} na linha e 1.570 kg m^{-3} na entrelinha da cultura, localizada a 0,75 m da linha (Tabela 6).

Tabela 6 - Densidade do solo obtida nas trincheiras na colheita da cana planta, em diferentes locais e profundidades. Média de 16 repetições

Profundidade (m)	Linha	Entrelinha kg m ⁻³	Média
0-0,2	1.460	1.530	1.490
0,2-0,4	1.610	1.640	1.620
0,4-0,6	1.510	1.540	1.530
Média	1.530	1.570	

As maiores diferenças foram encontradas em relação às profundidades, com compactação ligeiramente maior na camada de 0,2 a 0,4 m, que apresentou densidade de 1.620 kg m⁻³, superior à da camada de 0 a 0,2 m (1.490 kg m⁻³) e de 0,4 a 0,6 m (1.530 kg m⁻³). Essa compactação da camada de 0,2 a 0,4 m pode ser a principal razão pelo fato de 65% das raízes terem sido concentrados nessa camada. Entretanto, sinais visuais dos efeitos da compactação do solo na arquitetura radicular, como raízes “achatadas”, não foram observados em nenhuma camada.

Além da compactação, o horizonte AB (0,38 a 0,56 m) apresentou baixos teores de fósforo (3 mg dm⁻³ de P), cálcio (2 mmol_c dm⁻³ de Ca), magnésio (1 mmol_c dm⁻³ de Mg) e saturação por bases (16%) e altos teores de Al (8 mmol_c dm⁻³) e saturação por alumínio (65%), que pode ter limitado o desenvolvimento das raízes em profundidade. Segundo Furlani (1983), além de o alto teor de alumínio no solo ser tóxico às plantas e diminuir o desenvolvimento radicular, pode ainda provocar fixação do fósforo em formas menos disponíveis, diminuindo a taxa de respiração e interferindo em reações enzimáticas responsáveis pela deposição de polissacarídeos nas paredes celulares, além de modificar a dinâmica de absorção e transporte de vários nutrientes, principalmente cálcio e magnésio. O cálcio é fundamental para o crescimento das raízes, sendo essencial na divisão celular e para a manutenção da funcionalidade das membranas, além de complexar o alumínio tóxico (MARSCHNER; KIRKBY; CAKMAK, 1996; HAVLIN et al., 1999).

2.3.4 Raízes metabolicamente ativas

A percentagem de raízes metabolicamente ativas na colheita da cana-planta não sofreu influência da adubação nitrogenada de plantio (Tabela 7). Tanto na testemunha (sem N mineral) como na dose de 120 kg ha⁻¹ de N a percentagem de raízes metabolicamente ativas foram de mesma ordem de grandeza (38-40%).

Em relação à distribuição de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar, observou-se na colheita da cana-planta que a maior parte das raízes vivas encontrava-se na camada superficial e próximo da touceira de cana (Tabela 8). De maneira geral, a distribuição das raízes metabolicamente ativas parece não ter sido influenciada pela adubação nitrogenada de plantio, podendo estar associada a outros fatores.

Tabela 7 - Percentagem de raízes metabolicamente ativas, da massa total encontrada na colheita da cana planta, em função da fertilização nitrogenada de plantio

Parâmetros	Dose de N (kg ha ⁻¹)	
	0	120
Raízes metabolicamente ativas (%)	40 a	38 a
Desvio padrão da média	4,6	10,1
Coeficiente de variação (%)	11,6	26,6

Letras minúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Desvio padrão da média para n = 4

Tabela 8 - Percentagem de raízes metabolicamente ativas, da massa total encontrada em cada local na colheita da cana planta, em função da fertilização nitrogenada de plantio, por profundidade e distância da touceira

Prof m	Distância da linha de cana (m)					Média
	0-0,3	0,3-0,6	0,6-0,75	0,3-0,6	0-0,3	
----- Sem N -----						
0-0,2	54	11	11	39	46	47
0,2-0,4	41	8	13	22	37	39
0,4-0,6	23	15	8	9	21	20
Média	49	13	11	38	40	40
----- 120 kg ha ⁻¹ N -----						
0-0,2	43	11	11	10	42	44
0,2-0,4	26	12	9	11	37	32
0,4-0,6	29	13	14	11	23	26
Média	41	12	11	12	48	38

Faroni (2004), avaliando raízes metabolicamente ativas de soqueira de cana-de-açúcar com o mesmo método utilizado neste estudo, encontrou resultados diferentes dos aqui apresentados. O autor encontrou, na média de quatro épocas de amostragem (janeiro, março, maio e junho) durante o ciclo de uma segunda soca, maior distribuição percentual de raízes vivas em profundidade (31%), do que na superfície (23%). No estudo de Faroni (2004) a umidade no solo foi maior nas camadas mais profundas do que na superficial em janeiro, maio e junho, que pode estar associado à maior porcentagem de raízes vivas nas camadas mais profundas. Aguiar (1978) constatou maior porcentagem de raízes aparentemente vivas na camada de 0 a 0,2 m de outubro a maio; na camada de 0,2 a 0,4 m de maio a outubro e na camada de 0,4 a 0,6 m de maio a dezembro, associando à disponibilidade de água no solo a variabilidade encontrada na distribuição de raízes aparentemente vivas.

Observou-se pequena quantidade de raízes metabolicamente ativas na entrelinha da cultura, independentemente a adubação nitrogenada de plantio. Faroni e Trivelin (2004) observaram tendência de maior marcação isotópica nas raízes mais superficiais ao solo e próximas à linha de cana-de-açúcar, atribuindo esse efeito à possível desuniformidade de translocação do ^{15}N no sistema radicular. Os autores também comentam que a presença de raízes das plantas das linhas adjacentes poderiam estar favorecendo a diluição da marcação nas raízes na entrelinha, visto que naquele estudo somente as plantas do centro de uma linha receberam a marcação isotópica. Isso provavelmente não ocorreu no presente estudo, pois as raízes foram coletadas no centro de duas linhas de cana-de-açúcar que receberam a solução de uréia- ^{15}N para marcação do sistema radicular, sendo mínima as chances de presença de raízes de outras plantas que não as marcadas.

2.4 Conclusões

A amostragem de raízes de cana-de-açúcar com sonda (diâmetro interno de 0,055 m), coletando-se seis subamostras por parcela em cada profundidade, foi similar ao método do monólito, porém não foi eficiente para amostrar rizomas e a distribuição das raízes em diferentes locais e profundidades no solo;

A fertilização nitrogenada de plantio não promoveu maior acúmulo de massa de raízes de cana-de-açúcar e favoreceu a concentração das raízes na camada superficial;

Cerca de 70 % das raízes concentraram-se nos primeiros 0,2 m e 80% distribuíram-se nos 0,6 m centrais da touceira;

A compactação do solo e os baixos teores de fósforo, cálcio e magnésio e altos de alumínio não permitiram que o sistema radicular se aprofundasse no solo;

Na colheita da cana planta, a porcentagem de raízes metabolicamente ativas foi de 40% da massa total de raízes, se concentrando próximo à touceira de cana-de-açúcar.

Referências

AGUIAR, S.F. **Observações sobre sistema radicular de cana planta (*Saccharum spp*)**. Jaboticabal: UNESP, Faculdade de Ciências Agrária e Veterinárias, 1978. 24 p.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamic in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.

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

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin; Springer-Verlag, 1979. 188 p.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; TOZZI, C.L.; TORRE, A.; VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 365-371, 1994.

DREW, M.C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytologist**, Lancaster, v. 75, n. 3, p. 479-490, 1975.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FARONI, C.E. **Sistema radicular da cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 68 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar pela técnica da diluição isotópica com ^{15}N . In: FERTIBIO 2004, 2004, Lages. Lages: SBCS; UDESC, 2004. 1 CD-ROM.

_____. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 1007-1013, 2006.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O.; SILVA, P.H.; BOLOGNA, I.R.; VITTI, A.C.; FRANCO, H.C.J. Marcação de fitomassa de cana-de-açúcar com aplicação de solução de uréia marcada com ^{15}N . **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 6, p. 851-857, 2007.

FURLANI, P.R. Toxidade de alumínio e toxidez em plantas. In: RAIJ, B. van; BATAGLIA, O.C.; SILVA, N.M. **Acidez e calagem no Brasil**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983. p.78-86.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2005. p.255-289.

HAVLIN J.D.; BEATON J.D.; TISDALE L.T.; NELSON W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to soil management**. 6th ed. New York: Prentice Hall, 1999. 499 p.

KÖPKE, V. Methods for studying root growth. In: SYMPOSIUM ON THE SOIL/ROOT SYSTEM, Londrina, 1980. **Proceedings ...** Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 303-318.

MARSCHNER, H.; KIRKBY, E.A.; CAKMAK, I. Effect of mineral status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 47, p. 1255-1263, 1996.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III: conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 425-431, 1987.

SOUZA, F.S.; FARINELLI, R.; ROSOLEM, C.A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 387-392, 2007.

VASCONCELOS, A.C.M. O sistema radicular da cana-de-açúcar e a expressão do potencial de produção. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 20, 2002.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 849-858, 2003.

ZONTA, E.; BRASIL, F.C.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral das plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p 7- 52.

3 ACÚMULO DE FITOMASSA E NITROGÊNIO DURANTE O CICLO DA CANA-PLANTA RELACIONADO COM A ADUBAÇÃO NITROGENADA

Resumo

Poucos estudos avaliaram o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, relacionando fatores nutricionais e do ambiente, tanto no ciclo agrícola de cana-planta como de soqueiras, a fim de compreender melhor o crescimento e produtividade da cultura. Esse trabalho objetivou avaliar o desenvolvimento radicular e da parte aérea da cana-de-açúcar e o acúmulo de nitrogênio nestes compartimentos, ao longo do ciclo agrícola de cana-planta, em função de doses de nitrogênio (N) aplicadas no plantio. Foram instalados dois experimentos, um em Pirassununga/SP, em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (LVAe) e outro em Jaboticabal/SP, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd), ambos de textura média, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro tratamentos correspondentes às doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ N-uréia aplicada no plantio, e um tratamento testemunha, com quatro repetições. O plantio foi realizado em fevereiro de 2005 no LVAe e em abril no LVd e as massas de raízes e da parte aérea foram avaliadas em outubro de 2005, fevereiro de 2006 e, na colheita, em junho (LVAe) e julho (LVd) de 2006. As raízes foram amostradas utilizando sonda (diâmetro interno de 0,055 m) até 0,6 m de profundidade, separando-se as raízes do solo utilizando peneiras de 2 mm. Em dois metros de sulco foi colhida toda a parte aérea, obtida a massa de vegetal com umidade natural, triturada e subamostrada para determinação da umidade. As amostras foram moídas e analisadas quanto ao teor de nitrogênio. A fase de maior crescimento das raízes foi de outubro a fevereiro nos dois locais, com diminuição da massa de raízes deste período até a colheita, devido à morte de raízes causada pelo déficit hídrico, porém sem afetar o desenvolvimento da parte aérea. No LVd o nitrogênio aplicado no plantio exerceu pouco efeito no desenvolvimento e acúmulo de nitrogênio no sistema radicular e parte aérea, provavelmente devido à grande quantidade de nitrogênio incorporado ao solo na reforma do canavial, de 200 kg ha⁻¹ de N, sem efeito das doses na produtividade de colmos. No LVAe as doses de nitrogênio favoreceram o crescimento e acúmulo de nitrogênio na parte aérea em todas as épocas e de raízes em fevereiro, com efeito significativo na produtividade de colmos. A dinâmica de crescimento radicular está diretamente relacionada ao balanço de água no solo.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Parte aérea; Sistema radicular; Dinâmica de raízes

Phytomass and nitrogen accumulation during the plant-cane cycle related to the nitrogen fertilization

Abstract

Few studies has evaluated the root system development of the sugarcane in the agricultural cycles of cane-plant or ratoons, relating nutrition and environment factors, in order to understand better the growth and productivity of the crop. This work aimed to evaluate the root and shoot sugarcane development and the nitrogen accumulation in

these compartments, along the agricultural cycle of the cane-plant related to nitrogen (N) rates applied at the planting. Two experiments were carried out in randomized blocks design, with four replications, in two soils: in a Typic Eutruxox (TE), in Pirassununga/SP and a Arenic Kandistult (AK), in Jaboticabal/SP, both with medium texture. The treatments were rates of 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ N-urea applied at planting and a control treatment. The planting was done in February, 2005 in the TE and in April in the AK, with sampling (roots and shoots) being evaluated in October, 2005, February, 2006 and on the harvest in June (TE) and July (AK), 2006. The roots were sampled using a probe (internal diameter of 0.055 m) until 0.6 m depth, separating the roots of the soil using sieves of 2 mm. In two meters of furrows it was collect all the above ground part, obtained the green mass, which was milled and sub sampled to determine the humidity. The samples were ground and analyzed in relation to the nitrogen level. The phase with the highest growth of the roots was from October to February in both sites, with a decreasing mass of roots from this period until the harvest, due to the death of the roots caused by the water deficit, however without affect the shoots. In the AK the nitrogen applied at planting had a low effect on the development and accumulation of the nitrogen in the root system and shoots, probably due the large amount of nitrogen incorporated to the soil, of 200 kg ha⁻¹, as sugar cane residues, in the reform of sugarcane field, with no effect of the fertilizer-N rates on the stalk productivity. In the TE the fertilizer-N rates affected positively to the growth and nitrogen accumulation in the shoots in all times and in the roots in February, with a meaningful effect on the stalk productivity. The dynamic of root growth is directly related to the water balance in the soil.

Keywords: Sugarcane; Above ground part; Root system; Nitrogen; Root dynamic

3.1 Introdução

3.1.1 Adubação nitrogenada de cana-planta

Grande número de experimentos realizados há décadas em diversas regiões do Brasil já mostravam que a resposta da cana-planta ao nitrogênio é menor e menos freqüente que a observada em cana-soca (ALBUQUERQUE; MARINHO, 1983; ZAMBELLO JUNIOR; AZEREDO, 1983; CANTARELLA; RAIJ, 1985). Menos que 40% dos 81 ensaios realizados no Estado de São Paulo com cana-planta mostraram resposta ao N (CANTARELLA; RAIJ, 1985). Valores ainda menores foram apresentados por Azeredo et al. (1986), que somente encontrou resposta significativa em menos que 20% de um universo de 135 ensaios analisados em todo o Brasil.

Vários fatores têm sido listados para explicar as baixas respostas da cana-planta ao N, entre os quais a mineralização da matéria orgânica do solo e dos restos culturais da própria cana, favorecida pelo revolvimento do solo durante a reforma do canavial (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). Outros fatores que justificam a baixa resposta da cana-planta ao N incluem o maior vigor do sistema radicular da cana-planta comparado ao da soqueira, a melhoria da fertilidade do solo associado à calagem, a fixação biológica do N, a menor demanda inicial por nutrientes na cana-planta, as perdas de N do fertilizante por lixiviação e a contribuição do N contido no colmo semente (AZEREDO et al., 1986; URQUIAGA et al., 1992; CARNEIRO et al., 1995; ORLANDO FILHO et al., 1999, apud CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). Em grande parte dos experimentos com cana-planta verificou-se a baixa resposta da cultura à adubação nitrogenada, enquanto que, para as rebrotas da cultura (cana-soca) a maioria dos experimentos mostraram resposta na produção de colmos (CARNAÚBA, 1990). Segundo a autora, para diversos pesquisadores a maior eficiência de utilização de N pela cana-planta, ou menor resposta à adubação nitrogenada, é devido à maior reserva de N no solo disponível para a cultura. Com a reforma do canavial, as operações de preparo do solo aumentariam a aeração do mesmo, facilitando a mineralização da matéria orgânica incorporada, tal como raízes e outros restos de cultura, propiciando, assim, a entrada de N adicional ao solo.

O nitrogênio apresenta uma dinâmica muito intensa no sistema, fazendo com que as respostas da cana-de-açúcar a esse nutriente apresentem elevada variabilidade, aliado ao fato da inexistência de qualquer tipo de análise de solo que auxilie os técnicos na definição da dose de nitrogênio a aplicar no plantio da cana-de-açúcar. Aliado a isso, o grande número de cultivares existentes, tipos de solos, épocas de plantio, regimes hídricos, modalidades de aplicação do fertilizante e outras estratégias relacionadas ao setor sucroalcooleiro dificultam a decisão sobre a fertilização nitrogenada dos canaviais.

A maioria dos trabalhos com adubação nitrogenada em cana-planta avaliaram somente o primeiro corte, não levando em consideração a possibilidade da resposta aos fertilizantes se expressarem nos ciclos agrícolas subseqüentes, por meio do efeito residual, levando em consideração que a cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, que utiliza as reservas do sistema radicular para a rebrota (VITTI et al., 2007).

Ao mesmo tempo em que diversos trabalhos não verificaram resposta da cana-planta à aplicação do nitrogênio, muitos observaram o contrário. A produtividade de colmos da cana-planta passou de 62 a 104 t ha⁻¹ quando se adicionou 120 kg ha⁻¹ de N em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO distrófico álico (KORNDÖRFER et al., 1997). Já Orlando Filho et al. (1999), que avaliou a cana-planta e três socas consecutivas, verificou que a aplicação de 60 e 120 kg ha⁻¹ de N promoveu aumento na produtividade da ordem de 20 e 35% em relação à testemunha, respectivamente, na média dos 4 ciclos, fontes e formas de aplicação do nitrogênio, em um LATOSSOLO ROXO Eutrófico. Esses resultados, contrastantes com os que não verificaram resposta à adubação nitrogenada, aumentam ainda mais a dificuldade com relação à tomada de decisão sobre a adubação nitrogenada da cana-planta.

Poucos trabalhos avaliaram o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, devido à dificuldade de avaliação e à variabilidade dos resultados obtidos, mesmo sabendo-se de sua importância para a compreensão de efeitos no crescimento e produção da parte aérea da cultura. Vitti et al. (2007), em um NEOSSOLO QUATZARÊNICO cultivado com a cultivar SP81 3250, observaram que as doses de N proporcionam efeito linear altamente significativo na produtividade de colmos da 2ª soca e esse efeito manteve-se na 3ª soca, mesmo sendo aplicada dose única de N após a colheita da 2ª soca. Os dados demonstram que a adubação nitrogenada favoreceu o acúmulo de nutrientes no sistema radicular e que esse maior acúmulo se relacionou positivamente com a produtividade da cana-de-açúcar no ciclo agrícola subsequente, evidenciando efeito residual da adubação nitrogenada de soqueira.

Em trabalhos desenvolvidos em vasos com solo arenoso, na condição de cana-planta de ano (TRIVELIN et al., 2002) e de ano e meio (BOLOGNA-CAMPBELL, 2006), com as cultivares SP80 3280 e SP81 3250, respectivamente, os autores constataram aumento linear na massa da parte aérea e subterrânea (raízes e rizomas) e no acúmulo de nitrogênio nesses compartimentos em função da aplicação de doses de nitrogênio.

Portanto, há indícios de que a resposta à adubação nitrogenada em cana-planta esteja associada ao desenvolvimento de um sistema radicular mais vigoroso e com maior reserva nutricional, podendo resultar em ganhos de produtividade tanto no ciclo da cana-planta quanto nas soqueiras subsequentes.

3.1.2 O desenvolvimento de raízes de cana-de-açúcar

Em plantações comerciais de cana-de-açúcar, que são propagadas assexuadamente, o desenvolvimento do sistema radicular é iniciado logo após a plantação de uma porção de colmo com no mínimo uma gema lateral (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). As primeiras raízes formadas são as raízes dos colmos, que emergem de uma região radicular da gema ou nó, localizada acima da cicatriz da bainha da folha no colmo (Figura 1) (van DILLEWIJN, 1952; GLOVER, 1967 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Figura 1 - O sistema radicular de uma planta jovem de cana-de-açúcar, mostrando raízes do colmo crescendo da região radicular do colmo e raízes do perfilho emergindo da base do novo perfilho (BLACKBURN, 1984, apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005)

Raízes do colmo podem emergir dentro de 24 h do plantio (GLOVER, 1967, apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005), embora diferenças em tempo exigidas para a emergência de raízes ocorram para as cultivares. Raízes do colmo são finas e altamente ramificadas, sustentando o crescimento da planta nas primeiras semanas após a germinação. O segundo tipo de raízes são as raízes dos perfilhos, que emergem da base do novo perfilho 5 a 7 dias após o plantio (Figura 1). As raízes dos perfilhos são mais grossas e pontiagudas que as raízes do colmo. As raízes do colmo continuam

a crescer por um período de 6 a 15 dias após o plantio, a maioria senescendo e desaparecendo por volta de 60 a 90 dias (GLOVER, 1967, apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005), conforme o sistema radicular do perfilho se desenvolve e torna-se responsável pelo suprimento de água e nutrientes para o perfilho em desenvolvimento. Por volta de três meses as raízes do colmo compreendem menos de 2% da massa seca da raízes (DILLEWIJN, 1952).

Evans (1935 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005) observou nas ilhas Maurícios que raízes dos perfilhos se diferenciaram em três tipos funcionais conforme a cana-de-açúcar se desenvolve. As primeiras raízes a emergirem da base do perfilho jovem eram grossas e com pouca ramificação, formando “raízes de suporte” adaptadas para sustentação da planta. Raízes emergindo das gemas mais altas eram mais finas e altamente ramificadas, se estendendo lateralmente para formar uma densa rede de “raízes superficiais”, responsáveis pela absorção de água e nutrientes das camadas superficiais do solo. A terceira classe de raízes eram as “raízes cordão”, formadas de aglomerações de raízes verticais (Figura 2).

Blackburn (1984 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005) alertou que a arquitetura do sistema radicular mostrada na Figura 2 pode não ser muito comum na realidade, pois a distinção entre as raízes superficiais e de suporte podem ser muito súbitas e os sistemas de raízes cordão são muito raros. Muitos dos dados nos quais a descrição do sistema radicular da cana-de-açúcar foram baseados são antigos, levantando a questão se esse padrão tradicional de desenvolvimento de raízes é pronunciado nas cultivares modernas de cana-de-açúcar.

Figura 2 - Sistema radicular de uma touceira estabelecida de cana-de-açúcar, mostrando três tipos funcionais de raízes, as superficiais, de sustentação e as raízes cordão (BLACKBURN, 1984, apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005)

O crescimento das raízes responde fortemente ao ambiente do solo, criando plasticidade na forma e tamanho do sistema radicular (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). O tamanho e distribuição do sistema radicular é fortemente afetado pela distribuição e disponibilidade da água do solo, causando diferenças na capacidade das plantações em explorar recursos mais profundos do solo. Baran et al. (1974 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005) compararam a distribuição de raízes de cana-de-açúcar em solo siltoso irrigado em intervalos de 7, 14 e 21 dias. Raízes com idade de 12 meses foram mais profundamente distribuídas sob irrigação menos freqüente, presumivelmente em resposta ao secamento superficial do solo. O enraizamento mais profundo reduz a vulnerabilidade das plantações aos déficits de água no solo fornecendo uma capacidade superior para absorção de reservas profundas da água do solo, como demonstrados por Wood e Wood (1967 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Em comum com outras gramíneas, a relação raízes:parte aérea para cana-de-açúcar é mais alta durante o início do crescimento e então diminui, segundo Smith (1998 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005), que mediu a relação

raízes:parte aérea para cana-de-açúcar cultivada em vasos e constatou que ela diminuiu com a idade da planta após atingir um máximo de $0,42 \text{ kg kg}^{-1}$, a aproximadamente 50 dias de idade. Segundo o autor, a exclusão de metade do sistema radicular teve pouco efeito no crescimento da parte aérea, mas recuperou a proporção raízes:parte aérea após 20 dias, presumivelmente como resultado de um aumento relativo no crescimento das raízes. Além disso, a redução do tamanho do sistema radicular não causou mudança proporcional no crescimento da parte aérea e uso de água. Quando 50% das raízes foram removidas, ou fisicamente (por exclusão) ou funcionalmente (por irrigação induzida), o uso de água e taxa de alongamento da planta diminuíram somente 10%. Existe, portanto, “capacidade adicional” no sistema radicular da cana-de-açúcar e, sob condições de solo otimizadas, a cana-de-açúcar tem mais raízes do que é necessário para o crescimento máximo. Em condições de campo, essa capacidade adicional efetivamente protege a planta contra a perda de raízes em condições não favoráveis de solo (SMITH, 1998, apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Existe pouca informação disponível sobre renovação de raízes de cana-de-açúcar, mas evidências mostram que o sistema radicular não é completamente substituído quando ocorre o corte de colmos (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). Dados sobre taxas de renovação poderiam capacitar o cálculo da taxa de perda de biomassa subterrânea e auxiliar, portanto, na determinação da reserva de carbono subterrâneo para a cana-de-açúcar. Como resultado, não é conhecido se alguma relação existe entre a alocação de carbono nas raízes e componentes da produtividade em cana-de-açúcar, ou se existem fontes de variação na alocação que afeta a produtividade da cultura.

Segundo Vasconcelos (2002) a manutenção de grande massa seca de raízes resulta em grande gasto de energia metabólica e tem conseqüências negativas sobre o crescimento em altura das plantas e na produtividade. A manutenção de pequena massa radicular com formação de raízes novas, precedendo períodos críticos de umidade, pode contribuir para a manutenção da produtividade.

3.1.3 A adubação nitrogenada e o crescimento de raízes

Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) avaliaram a massa de raízes, colmos e rebolos subterrâneos da cana-de-açúcar por peneiramento aos 3, 6, 11 e 16 meses após o plantio sem e com (60 kg ha^{-1} de N) adubação nitrogenada, em um Argissolo Vermelho Amarelo, textura arenosa, em Pernambuco. Observaram que somente houve diferença entre tratamentos com e sem N com relação à massa de raízes aos 6 e 16 meses de idade e que a adubação nitrogenada não influenciou a massa de colmos e rebolos subterrâneos em nenhuma época avaliada. Na média das doses de nitrogênio, a massa de raízes e colmos subterrâneos aos 3, 6, 11 e 16 meses foi, respectivamente, de 0,86 e 2,5; 1,6 e 3,8; 2,0 e 4,4; 2,0 e 3,6 t ha^{-1} . O nitrogênio foi o nutriente que apresentou maior acúmulo na parte subterrânea (raízes e colmos subterrâneos), variando de 16 a 22 kg ha^{-1} , não variando em relação à época de avaliação e doses de nitrogênio.

Drew (1975) evidenciou aumento significativo da ramificação de raízes de cevada causada pelo fornecimento de nitrogênio em solução nutritiva em partes específicas do sistema radicular, tanto para a fonte amônio quanto para nitrato, diminuindo a ramificação nas zonas que não receberam o nutriente (Figura 4). Efeito semelhante ocorreu para o fósforo, enquanto o fornecimento ou não do potássio não promoveu mudanças na arquitetura radicular.

Figura 3 - Efeitos do suprimento localizado de fósforo, nitrato, amônio e potássio, na forma das raízes. Plantas controle (HHH) receberam solução nutritiva completa em todas partes do sistema radicular. As outras raízes (LHL) receberam a solução nutritiva completa somente na região central, acima e abaixo sendo suprida com uma solução deficiente no nutriente específico (DREW, 1975)

Thorburn et al. (2003) sugeriu que o suprimento de nutrientes pode afetar os padrões de enraizamento da cana-de-açúcar. Quando nenhuma fonte de nitrogênio foi aplicada, o nitrogênio mineral foi retirado tanto da linha quanto da entrelinha das parcelas experimentais. Por outro lado, o nitrogênio não foi removido das entrelinhas quando foi aplicado 120 a 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio. Houve também tendência para menor remoção de nitrogênio da profundidade de 1,5 m no tratamento com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio. A disponibilidade de nitrogênio mineral afetou, portanto, a distribuição da atividade das raízes, possivelmente por causa dos impactos na distribuição das raízes.

Diante do exposto, esse trabalho teve por objetivo avaliar o desenvolvimento e acúmulo de nitrogênio no sistema radicular e parte aérea da cana-de-açúcar no ciclo da cana-planta, em função da adubação nitrogenada de plantio, em duas condições típicas de cultivo da cultura no Estado de São Paulo.

3.2 Material e métodos

Os estudos foram realizados em áreas comerciais de cana-de-açúcar nos municípios de Jaboticabal/SP (Usina Santa Adélia) e Pirassununga/SP (Usina São Luiz), com a cultivar SP 81 3250. A área experimental da Usina Santa Adélia situa-se na latitude Sul de 21°19'98", longitude Oeste de 48°19'03" e altitude predominante de 600 m. O valor médio de precipitação anual, calculado de uma série histórica (1956 a 1995), é de 1.428 mm. A área experimental da Usina São Luiz localiza-se na latitude Sul de 21° 55' 54" e Longitude Oeste de 47° 10' 54", com altitude predominante na região de 650 m.

3.2.1 Caracterização dos solos

Em Pirassununga/SP o solo é um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (LVAe) e em Jaboticabal/SP um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd) (EMPRAPA, 1999), referentes a um Typic Eustrtox e Arenic Kandistults pela Soil Taxonomy, respectivamente. A caracterização química e física dos solos (Tabelas 1 e 2) foi realizada a partir de amostras coletadas em diferentes profundidades na parede da trincheira aberta na área de bordadura dos experimentos, onde foram coletadas amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo e amostras deformadas para análise química (RAIJ et al., 2001) e granulométrica, pelo método da pipeta (GEE; OR, 2002).

Tabela 1 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (Typic Eustrtox). Pirassununga/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,2 m)	7,2	20	10	1,9	43	11	0	8	63,9	87	260	1641
BA (0,44 m)	6,5	8	1	2,6	7	3	0	11	23,6	53	269	1634
BW ₁ (0,81 m)	6,9	6	2	2,5	11	4	0	10	27,5	64	248	1445
BW ₂ (0,81+)	6,4	8	1	1,8	18	7	0	11	37,8	71	231	1373

* ρ = densidade do solo.

Tabela 2 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (Arenic Kandiusults). Jaboticabal/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹							%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,15 m)	5,6	23	10	3,6	18	13	0	17	51,6	67	285	1305
A ₂ (0,37 m)	4,7	16	11	2,2	9	5	2	18	34,2	47	296	1460
BA (0,56 m)	4,1	11	3	1,2	2	1	8	31	35,2	12	347	1391
BW ₁ (0,96 m)	4,4	8	1	0,9	3	1	3	20	24,9	20	371	1208
BW ₂ (0,96+)	5,1	7	1	3,5	2	1	0	9	15,5	42	367	1244

* ρ = densidade do solo.

3.2.2 Instalação e delineamento experimental

Nas duas áreas experimentais o preparo do solo foi convencional. Na Usina Santa Adélia a seqüência de operações foi a aplicação de herbicida para dessecação da soqueira, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, aração, gradagem intermediária e sulcação. Na Usina São Luiz a seqüência de operações foi a passagem de grade aradora para eliminação da soqueira, subsolagem, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 2 t ha⁻¹ de gesso agrícola, grade aradora, grade intermediária e sulcação. Os sulcos foram abertos com cerca de 0,35 m de profundidade, sendo utilizadas cerca de 15 gemas viáveis por metro, além de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 de K₂O, na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Antes das mudas serem cobertas com solo (cobrição das mudas) foi aplicado inseticida e nematicida. As mudas foram cobertas com uma camada de 0,1 m de terra.

O plantio foi realizado no dia 22 de fevereiro de 2005 na Usina São Luiz e no dia 05 de abril na Usina Santa Adélia, sendo as colheitas realizadas após 15 meses do plantio, em junho e julho de 2006, respectivamente.

Cada parcela experimental foi constituída de 48 sulcos espaçados em 1,5 m, com 15 m de comprimento, totalizando 1.080 m² por parcela. O delineamento experimental foi em blocos completos casualizados com 4 tratamentos, referente às doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ N aplicado na forma de uréia no sulco de plantio, além de uma testemunha (sem N mineral), com 4 repetições.

3.2.3 Sistema radicular

Em outubro de 2005, fevereiro e junho de 2006 (LVAe) e julho de 2006 (LVd) foram realizadas amostragens do sistema radicular e da parte aérea da cultura. Para a amostragem de raízes foi utilizado sonda em aço inox, com 0,055 m de diâmetro interno, até a profundidade de 0,6 m. As amostras foram retiradas de centro a centro da entrelinha, sendo duas amostras coletas sobre a linha de cana, duas a 0,3 m da linha e duas a 0,6 m (cada uma de um lado da linha), de modo que essas 6 amostras representem todo perfil de solo explorado pelo sistema radicular (Figura 4).

A separação das raízes do solo foi realizada no campo, utilizando peneiras com malha de 2 mm e no laboratório as amostras de raízes foram lavadas em água corrente sobre peneiras com malha de 1 mm, sendo posteriormente secas em estufa a 65° C, durante 48 h, até a obtenção da massa constante, para determinação da umidade. As amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e feitas as determinações de nitrogênio segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Somente na colheita (julho na USA e junho na USL) foi realizada amostragem dos rizomas subterrâneos, por meio da abertura de mini trincheiras de 1 m de comprimento na projeção da linha da cana, coletando-se todos os rizomas por peneiramento em peneira com malha de 2 mm.

Figura 4 - Esquema de amostragem do sistema radicular com sonda no ciclo da cana-planta

Para obtenção da massa de raízes por hectare considerou-se a densidade de raízes em cada local amostrado e em cada profundidade (dividindo-se a massa de raízes obtida pelo volume amostrado pela sonda) e multiplicou-se essa densidade pelo volume de solo que esse local representa, em termos de $\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$. Assim, obteve-se a massa de raízes em cada local (A, B e C) e em cada profundidade, expressos em kg ha^{-1} . A fórmula abaixo foi utilizada para obter a massa de raízes em cada profundidade (0-0,3 e 0,3-0,6 m) e a soma da massa de raízes nas duas profundidades resultou na massa de raízes por hectare, até 0,6 m:

$$\text{MR} = [(M_A/2)/V_s) \times (V_A)) + ((M_B/2)/V_s) \times (V_B)) + ((M_C/2)/V_s) \times (V_C))] \times 1000$$

Onde:

MR = massa de raízes, em kg ha^{-1} ;

M_A , M_B e M_C = massa de raízes (g) obtida no local A, B e C, respectivamente;

V_s = volume amostrado pela sonda ($0,713 \text{ dm}^3$ na cana-planta);

V_A = volume de solo ($\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$) representado pela faixa amostrada A, obtido por (a);

V_B e V_C = volume de solo ($\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$) representado pela faixa amostrada B e C, obtido por (b);

$$(a) V_A = (0,3 m_{\text{largura}} \times 0,3 m_{\text{profund}} \times 6667 m_{\text{comprim}}) \times 1.000 = 600.000 \text{ dm}^3$$

$$(b) V_{B \text{ e } C} = (0,6 m_{\text{largura}} \times 0,3 m_{\text{profund}} \times 6667 m_{\text{comprim}}) \times 1.000 = 1.200.000 \text{ dm}^3$$

3.2.4 Parte aérea

Na avaliação da parte aérea da cultura foi coletada toda a planta, contendo colmos, ponteiro e folhas secas, em 2 metros seguidos na linha da cultura para cada parcela. Após a obtenção da massa de material fresco, as amostras foram trituradas em trituradora tipo forrageira (marca Nogueira) e uma subamostra de aproximadamente 0,7 kg foi coletada. A subamostra foi acondicionada em saco plástico para evitar a perda de umidade até a chegada ao laboratório. Após a obtenção da massa de matéria fresca da subamostra, as mesmas foram secas em estufa a 65°C durante 48 h, até atingirem massa constante.

O cálculo da fitomassa seca da parte aérea foi realizado da seguinte maneira:

$$\text{FSPA} = [(M/2) \times (10.000/e)]$$

Onde:

FSPA = fitomassa seca da parte aérea, em kg ha^{-1} ;

M = massa de matéria seca da amostra coletada em 2 m;

10.000 = área de 1 ha, em m^2 ;

e = espaçamento entre linha da cana, de 1,5 m.

3.2.5 Análise estatística

Os resultados obtidos em cada época e para cada compartimento da planta (raízes e parte aérea) foram submetidos à análise de variância e, quando o F foi significativo, procedeu-se a análise de regressão para as doses de nitrogênio no plantio.

3.3 Resultados e discussões

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados da análise química de solo, na média das camadas de 0-0,25 e 0,25-0,50 m, respectivamente na Usina Santa Adélia e Usina São Luiz, em amostras coletadas em janeiro de 2005 (antes da instalação) e em setembro de 2006 (após o 1º corte).

Na USA o teor de S diminuiu, devido à absorção pela cana-de-açúcar e ao movimento do sulfato no perfil do solo, se deslocando para camadas mais profundas. Os teores de fósforo e potássio se mantiveram estáveis no solo e os de Ca, Mg, SB, CTC e V% aumentaram de um ano para o outro, devido à solubilização do calcário dolomítico que foi aplicado antes da implantação do experimento, fornecendo cálcio e magnésio e contribuindo para a elevação da CTC e da saturação por bases do solo. O teor de matéria orgânica foi maior após a colheita da cana quando comparado à amostragem realizada antes do plantio.

Figura 5 - Atributos químicos da camada de 0 a 0,5 m da área da Usina Santa Adélia antes da instalação (2005) e após a colheita da cana-planta (2006). Unidade dos resultados: MO (matéria orgânica) em g dm^{-3} ; P_{resina} e S em mg dm^{-3} ; K, Ca, Mg, H+Al, SB (soma de bases) e CTC (Capacidade de troca catiônica) em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e V% (saturação por bases) em %

Figura 6 - Atributos químicos da camada de 0 a 0,5 m da área da Usina São Luiz antes da instalação (2005) e após a colheita da cana-planta (2006). Unidade dos resultados: MO (matéria orgânica) em g dm^{-3} ; P_{resina} e S em mg dm^{-3} ; K, Ca, Mg, H+Al, SB (soma de bases) e CTC (Capacidade de troca catiônica) em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ e V% (saturação por bases) em %

Na área da USL, o teor de enxofre diminuiu pelos mesmos motivos mencionados acima. Os teores de fósforo e potássio sofreram decréscimo no solo de um ano para outro, devido principalmente à absorção pelas plantas, visto que os estoques desses nutrientes no solo eram mais baixos que os da USA, e as doses desses elementos aplicadas no plantio não foram suficientes para proporcionar a manutenção dos teores no solo após um ciclo agrícola. De forma semelhante ao ocorrido na USA, os teores de Ca, Mg, SB, CTC e V% aumentaram, provavelmente devido à solubilização do calcário dolomítico (2 t ha^{-1}) que foi aplicado antes da implantação do experimento.

A pluviosidade foi semelhante nos dois locais, totalizando aproximadamente 1.500 mm no ciclo da cana-planta, e com distribuição similar, exceção feita ao período de janeiro a março de 2006 em que houve um excedente na área da USA (Figura 7).

De maneira geral, as duas áreas passaram por um período com poucas precipitações na fase inicial do ciclo da cultura (abril a setembro) e um período chuvoso de dezembro a março, época que representa a fase de máximo crescimento da cana-de-açúcar. Na USA as chuvas cessaram em abril e na USL em maio, época que representou o início do período de maturação da cana.

Figura 7 - Distribuição da precipitação pluvial no ciclo da cana-planta na Usina Santa Adélia (USA) e São Luiz (USL)

3.3.1 LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico - Usina Santa Adélia

Desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular

Na Usina Santa Adélia o desenvolvimento de raízes foi influenciado pela adubação nitrogenada de plantio em outubro, aos 6 meses após o plantio, sendo encontrada maior massa de raízes nas parcelas que receberam fertilizante nitrogenado (Tabela 3).

Esses resultados corroboram com os obtidos por Sampaio et al. (1987), no qual a adubação nitrogenada de plantio influenciou o crescimento de raízes aos 6 meses após o plantio, embora naquele trabalho aos 16 meses a massa de raízes também foi superior nos tratamentos adubados, o que não ocorreu neste estudo. Em trabalhos desenvolvidos em vasos com solo arenoso, na condição de cana-planta de ano (TRIVELIN et al., 2002) e de ano e meio (BOLOGNA-CAMPBELL, 2006), com as cultivares SP80 3280 e SP81 3250, respectivamente, constataram aumento linear na massa da parte aérea e subterrânea (raízes e rizomas) em função da aplicação de doses de nitrogênio.

Tabela 3 - Fitomassa seca de raízes e da parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) nas épocas de amostragens em função da fertilização nitrogenada de plantio. Média de 4 repetições. Jaboticabal/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Outubro de 2005		Fevereiro de 2006		Julho de 2006		
	R	PA	R	PA	R	RIZOMA	PA
	kg ha ⁻¹						
0	1.176	9.395	6.221	30.450	2.477	6.369	60.068
40	1.051	11.480	6.409	34.440	2.857	4.534	59.778
80	1.501	11.422	6.769	36.191	2.017	4.498	60.846
120	1.317	10.532	8.123	38.905	2.168	5.523	59.738
Média	1.261	10.707	6.881	34.997	2.380	5.231	60.107
CV (%)	17	13	23	11	36	63	7
R² RL	0,36*	NS	NS	0,98***	NS	ns	NS
R² RQ	NS	NS	NS	NS	NS	ns	NS

R = raízes; PA = parte aérea.

*** e * significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{NS} = não significativo.

Aos 6 meses, o desenvolvimento da parte aérea não sofreu influência da adubação nitrogenada de plantio. De outubro a fevereiro, ocorreu acúmulo acentuado na massa de raízes e parte aérea seca, de cerca de 5.600 kg ha⁻¹ e 24.300 kg ha⁻¹, respectivamente, na média das doses de N, representando a fase de máximo crescimento da cultura.

Em fevereiro, aos 10 meses do plantio, a massa da parte aérea aumentou linearmente com as doses de N aplicadas no plantio, enquanto nas raízes houve uma tendência de aumento, porém não significativo. De fevereiro a julho a massa de raízes diminuiu, devido provavelmente à morte desses órgãos causada pela diminuição das chuvas (Figura 3), além de fatores relacionadas à fisiologia do crescimento radicular da cana. Vasconcelos (2002) evidenciou ocorrência de morte parcial de raízes em cana-soca relacionada às condições de disponibilidade hídrica do solo. Nesse mesmo período a massa da parte aérea seca aumentou, provavelmente passando por um máximo de crescimento e diminuindo à medida que se iniciou o processo de maturação da cana-de-açúcar. Em julho de 2006, na colheita da cana, a massa de raízes e parte aérea não sofreram influência das doses de N de plantio, provavelmente devido aos fatores limitantes que ocorreram no período de fevereiro a julho, principalmente relacionados à disponibilidade hídrica, limitando a possibilidade de resposta ao nitrogênio. A maior massa da parte aérea em fevereiro nos tratamentos com nitrogênio resultou em maior área foliar e maior consumo de água, além da manutenção de um sistema radicular mais vigoroso nesses tratamentos (que gerou maior gasto energético para a planta), que pode ter favorecido a ocorrência de déficit hídrico mais acentuado nos tratamentos que receberam o fertilizante nitrogenado, igualando a massa de raízes e parte aérea na colheita.

A massa de rizoma, que somente foi avaliada na colheita, em julho de 2006, não sofreu influência da adubação nitrogenada de plantio, corroborando com os resultados obtidos por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987), em que a adubação nitrogenada não teve efeito nos colmos e rebolos subterrâneos em nenhuma época avaliada no ciclo da cana-planta.

O maior acúmulo de massa ocorreu de outubro a fevereiro (Figura 8), que representou a fase de maior crescimento da cana-de-açúcar.

Figura 8 - Fitomassa seca de raízes e da parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) durante o ciclo da cana-planta em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina Santa Adélia. As barras representam o desvio padrão da média para n=4

Após esse período as condições climáticas tornam-se mais adversas ao crescimento vegetativo, como diminuição da precipitação, da radiação solar e da temperatura, favorecendo o início da fase de maturação da cultura. Na USA, as doses de nitrogênio aplicadas no plantio favoreceram o crescimento da parte aérea em fevereiro de 2006 (Figura 8), quando as condições climáticas foram favoráveis ao crescimento vegetativo.

Utilizando os resultados de armazenamento de água no solo no ciclo da cana-planta neste mesmo experimento obtidos por Brito (2006), procurou-se estabelecer algum tipo de relação entre o armazenamento de água no solo e a massa de raízes nas épocas. Observou-se que há boa relação entre a água armazenada no solo até a camada de 0,6 m e a quantidade de raízes nessa mesma profundidade (Figura 9).

O armazenamento de água no solo seguiu padrão similar às precipitações ocorridas na área (Figura 7).

Figura 9 - Armazenamento de água nos primeiros 0,6 m do solo (mm) e massa de raízes seca (kg ha⁻¹) no ciclo da cana-planta na Usina Santa Adélia. Jaboticabal/SP

O armazenamento de água nos primeiros 0,6 m do solo atingiu o valor máximo de 155 mm em fevereiro de 2006, mês em que a precipitação atingiu valor da ordem de 400 mm, coincidindo com a época em que foi encontrada a maior massa de raízes seca, de 6.880 kg ha⁻¹, na média das quatro doses de nitrogênio. A partir desse mês a precipitação diminuiu, assim como o armazenamento de água no solo e a massa de raízes, indicando que a morte do sistema radicular ocorreu devido à diminuição da umidade de solo e que o crescimento das raízes de cana-de-açúcar apresenta relação estreita com a quantidade de água armazenada no solo.

Diversos autores associaram a dinâmica de desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar à disponibilidade de água no solo (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005; BARAN et al., 1974; VASCONCELOS, 2002). Isso sugere que em estudos que avaliam o sistema radicular de cana-de-açúcar, é interessante avaliar também a umidade do solo, ou preferivelmente o armazenamento de água no solo até a profundidade que se pretende realizar estudo das raízes.

Acúmulo de nitrogênio na parte aérea e sistema radicular

A fertilização nitrogenada de plantio favoreceu o acúmulo de nitrogênio nas raízes em outubro e na parte aérea em fevereiro (Tabela 4). Esse maior acúmulo deveu-se ao aumento da massa de raízes e da parte aérea proporcionado, nas respectivas épocas, pelas doses de N (Tabela 3), visto que a concentração de nitrogênio não foi alterada com a adubação nitrogenada (dados não apresentados).

Na média das doses, o acúmulo de N nas raízes foi de 7, 38 e 11 kg ha⁻¹ aos 6, 10 e 15 meses após o plantio, respectivamente, e de 34 kg ha⁻¹ nos rizomas na colheita (Tabela 4).

Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) avaliaram o acúmulo total nas raízes, colmos e rebolos subterrâneos, encontrando valores da ordem de 16 a 22 kg ha⁻¹ de N em todas as épocas avaliadas (aos 3, 6, 11 e 16 meses do plantio), independentemente da adubação nitrogenada de plantio, portanto inferiores aos obtidos no presente estudo.

Tabela 4 - Estoque de nitrogênio nas raízes e parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) em função da fertilização nitrogenada de plantio. Jaboticabal/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Outubro de 2005		Fevereiro de 2006		Julho de 2006		
	R	PA	R	PA	R	RIZOMA	PA
0	6	107	35	148	12	37	204
40	5	117	36	164	11	28	184
80	10	111	39	151	9	33	221
120	8	113	43	196	11	38	175
Média	7 (6)	112 (94)	38 (19)	165 (81)	11 (5)	34	196 (95)
CV (%)	27	8	24	14	39	18	17
R² RL	0,45***	NS	NS	0,57***	NS	NS	NS
R² RQ	NS	NS	NS	0,72**	NS	NS	NS

R = raízes; PA = parte aérea.

*** e ** significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ^{NS} = não significativo. Os números entre parênteses representam a porcentagem de N acumulado na raízes e parte aérea, em cada época

Somando-se o acúmulo de N nas raízes e rizomas na colheita (aos 15 meses do plantio), foram obtidos valores da ordem de 40 a 50 kg ha⁻¹ de N, bastante superior ao valor de 20 kg ha⁻¹ de N acumulado no sistema radicular na colheita no trabalho de Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987). A principal hipótese para essas diferenças refere-se à questão varietal e condições edafoclimáticas distintas nos dois experimentos. O trabalho de Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) foi desenvolvido em um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO de textura arenosa, com a cultivar Co997, enquanto este estudo foi desenvolvido em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico de textura média, provavelmente com um maior estoque de N no perfil do solo e com a cultivar SP81 3250, mais moderna e, provavelmente, mais exigente quanto à nutrição. Outra hipótese para essas diferenças pode estar associada ao acúmulo de nitrogênio na parte aérea da cultura, que foi de 196 kg ha⁻¹ de N acumulado nos colmos, folhas secas e ponteiros (na média das doses de N), superior ao obtido por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1984), de 180 kg ha⁻¹ de N. Em ambos os trabalhos não houve diferença significativa no acúmulo de nitrogênio na parte aérea em função da fertilização nitrogenada de plantio.

O acúmulo de nitrogênio na parte aérea foi crescente nas épocas, enquanto que nas raízes foi crescente de outubro a fevereiro, quando alcançou o máximo, diminuindo o acúmulo em julho, na colheita. De fevereiro a julho, provavelmente ocorreu translocação do nitrogênio do sistema radicular para a parte aérea. Entretanto, na dose de 120 kg ha⁻¹ de N, houve diminuição no acúmulo de nitrogênio na parte aérea de fevereiro a julho, indicando que podem ter ocorrido perdas de nitrogênio pela parte aérea da cultura.

Em fevereiro, aos 10 meses de desenvolvimento da cultura, 38% do nitrogênio da planta inteira encontravam-se acumulado nas raízes, frente a 6% em fevereiro e 5% em julho, no final do ciclo (Tabela 4). Isso indica que, de outubro a fevereiro, quando as condições climáticas são favoráveis ao desenvolvimento, há um crescimento pronunciado com acúmulo de nutrientes no sistema radicular, visando suprir a parte aérea com nutrientes e água. Esse estoque de nutrientes no sistema radicular favorece o crescimento acelerado da parte aérea, servindo de reserva nutricional para a planta

no período subsequente, quando as condições climáticas podem se tornar mais adversas.

Embora no presente trabalho as doses de nitrogênio aplicadas no plantio não favoreceram o acúmulo de nitrogênio na parte aérea e no sistema radicular na colheita, outros trabalhos da literatura demonstram o contrário. Em condições de vaso, a adubação nitrogenada de plantio promoveu aumento linear no acúmulo de nitrogênio na parte aérea e subterrânea (raízes e rizomas) em cana-planta de ano (TRIVELIN et al., 2002) e cana-planta de ano e meio (BOLOGNA-CAMPBELL, 2006). Isso foi devido, provavelmente, às condições mais favoráveis de resposta ao nitrogênio oferecidas nesses trabalhos, como solo arenoso, ausência de déficit hídrico com uso de irrigação complementar e cultivares exigentes quanto à nutrição.

Na colheita o tratamento que não recebeu o fertilizante nitrogenado acumulou quantidade relativamente elevada de nitrogênio na parte aérea e no sistema radicular, sem diferir dos tratamentos fertilizados. Isso pode ser devido à elevada quantidade de resíduos incorporados na reforma do canavial, que contribuiu com cerca de 200 kg ha⁻¹ N para o sistema solo-cana-de-açúcar (FRANCO et al., 2007). A falta de significância no acúmulo de nitrogênio na colheita nos tratamentos com doses de N no plantio, tanto no sistema radicular quanto na parte aérea, certamente é a explicação para a falta de resposta em produtividade no experimento da Usina Santa Adélia, que foi de 145, 144, 147 e 146 t ha⁻¹ para a testemunha e doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, sem significância estatística pelo estudo da regressão. Entretanto, a adubação nitrogenada de plantio promoveu efeito quadrático no teor de pol da cana, que foi de 15,6; 16,9; 16,8 e 15,8% para a testemunha e doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Esse maior acúmulo de pol nos tratamentos fertilizados provavelmente está associado a melhor nutrição das plantas proporcionada pela adubação nitrogenada, que pode ter favorecido a absorção de outros nutrientes, porém que não foram considerados neste trabalho.

3.3.2 LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Eutrófico - Usina São Luiz

Desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular

Em todas as épocas de amostragem o crescimento da parte aérea foi favorecido pela adubação nitrogenada de plantio, com efeito linear em todas as épocas (Tabela 5), assim como na produtividade de colmos ($\alpha \leq 10\%$), de 134, 142, 139 e 141 t ha⁻¹ para a testemunha e doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Trivelin et al. (2002) e Bologna-Campbell (2006) que, em condições de vaso, verificaram aumento linear na massa da parte aérea em função das doses de nitrogênio aplicadas no plantio, em cana de ano e cana de ano e meio, respectivamente. Nesses trabalhos também constataram maior massa do sistema radicular (raízes e rizomas) em função das doses de nitrogênio, o que não foi verificada no presente estudo, sendo difícil comparar os resultados devido ao favorecimento do crescimento radicular em condições de vaso. Na colheita e na média das doses de nitrogênio, Bologna-Campbell (2006) encontrou uma relação parte aérea:sistema radicular igual a 6, enquanto que no presente trabalho a relação foi igual a 8 tanto na área da USA quanto na da USL, considerando o sistema radicular como a soma da massa de raízes e rizomas, o que evidencia o maior crescimento radicular em condições de vaso.

Tabela 5 - Fitomassa seca de raízes e da parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) nas épocas em função da fertilização nitrogenada de plantio. Pirassununga/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Outubro de 2005		Fevereiro de 2006		Junho de 2006		
	R	PA	R	PA	R	RIZOMA	PA
0	1.994	9.340	3.999	30.982	1.858	4.072	41.921
40	688	11.771	4.869	32.208	2.843	2.790	51.588
80	844	15.209	4.327	37.446	2.258	6.324	61.147
120	585	13.755	6.646	35.536	3.062	3.959	61.932
Média	1.028	12.518	4.960	34.043	2.505	4.286	54.147
CV (%)	59	21	34	11	33	47	20
R² RL	0,65***	0,72***	0,66**	0,67***	NS	NS	0,91***
R² RQ	0,86***	0,91**	NS	NS	NS	NS	NS

R = raízes; PA = parte aérea

*** e ** significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ^{NS} = não significativo

A fertilização nitrogenada de plantio, realizada em fevereiro de 2005, resultou em menor massa de raízes em outubro (aos 7 meses após o plantio), maior em fevereiro (aos 12 meses) e não exerceu influência na massa de raízes na colheita, aos 16 meses (Tabela 5). Os resultados não estão de acordo com os obtidos por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987), que encontraram maior massa de raízes aos 6 e 16 meses após o plantio na dose de 60 kg ha^{-1} de N em relação à testemunha, e não encontraram diferença aos 11 meses após o plantio, justamente quando foi encontrada maior massa de raízes nos tratamentos fertilizados no presente estudo. Também não corroboram aos obtidos no experimento da Usina Santa Adélia, onde a massa de raízes somente foi maior nos tratamentos fertilizados aos 6 meses após o plantio (Tabela 3). Entretanto, no caso da Usina São Luiz, embora a massa de raízes foi significativamente inferior nos tratamentos fertilizados aos 7 meses após o plantio, não causou prejuízo ao crescimento da parte aérea nesse período, que foi maior nos tratamentos adubados. Em relação ao crescimento das raízes em função do nitrogênio, Souza, Farinelli e Rosolem (2007) verificaram redução do comprimento radicular do algodão quando o fertilizante (500 kg ha^{-1} de 02-20-20) foi aplicado próximo à semente (2,5 cm de cada lado e 5 cm abaixo da semente), em avaliação realizada algumas semanas após o plantio. Esses autores atribuíram ao efeito salino do fertilizante o menor crescimento radicular. Por outro lado, Drew (1975) evidenciou aumento significativo da ramificação de raízes de cevada causada pelo fornecimento de nitrogênio em solução nutritiva em partes específicas do sistema radicular, tanto para a fonte amônio quanto para nitrato, diminuindo a ramificação nas zonas que não receberam o fertilizante. Efeito semelhante ocorreu para o fósforo, enquanto o fornecimento ou não do potássio não promoveu mudanças na arquitetura radicular. Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) evidenciaram efeito significativo da fertilização nitrogenada de plantio na massa de raízes seca de cana-de-açúcar aos 6 e 16 meses após o plantio (colheita), encontrando $1,3$ e $1,8 \text{ t ha}^{-1}$ aos 6 meses e $1,7$ e $2,25 \text{ t ha}^{-1}$ de raízes aos 16 meses, na testemunha e na dose de 60 kg ha^{-1} de N, respectivamente.

Portanto, existem duas hipóteses para a menor massa de raízes seca encontrada nos tratamentos fertilizados aos 7 meses após o plantio. A primeira pode ser devido ao efeito salino do fertilizante nitrogenado reduzindo o crescimento de raízes

e a segunda pela maior ramificação radicular próximo aos grânulos dos fertilizantes, reduzindo a ramificação nas regiões que não receberam o fertilizante, suportado pelos dados obtidos por Drew (1975). Embora não seja permitido obter uma conclusão a respeito dos dados obtidos, há indícios de que a segunda hipótese seja a mais apropriada, visto que não houve redução no crescimento da parte aérea nos tratamentos que receberam o fertilizante nitrogenado; pelo contrário, o crescimento foi maior provavelmente devido ao menor gasto energético despendido para o crescimento das raízes, favorecendo o crescimento da parte aérea. Entretanto, mais estudos devem ser realizados para elucidar essa questão.

Portanto, na fase inicial de crescimento da planta e das raízes a hipótese é de que, nas parcelas que receberam o fertilizante nitrogenado as raízes se desenvolveram próximas aos grânulos de fertilizantes, obtendo os nutrientes necessários para o crescimento da parte aérea com pequeno gasto energético para o crescimento das raízes, enquanto que nas parcelas que não receberam o fertilizante nitrogenado, houve maior gasto energético para o crescimento das raízes visando explorar um maior volume de solo, competindo com fotoassimilados para o crescimento da parte aérea, que foi prejudicada nesse tratamento.

Em fevereiro, após 11 meses do plantio, o efeito no crescimento das raízes se inverteu, com maior crescimento nos tratamentos que receberam o fertilizante nitrogenado, porém sem comprometer o desenvolvimento da parte aérea que continuou maior nos tratamentos fertilizados.

A maior massa de raízes foi encontrada em fevereiro, quando as condições edafoclimáticas são favoráveis para o desenvolvimento da planta. De fevereiro a junho, quando as condições climáticas se tornam mais adversas ao crescimento da planta e favorecem o processo de maturação, houve diminuição da massa de raízes. Em junho, na colheita, as doses de nitrogênio exerceram pouco efeito na massa de raízes, sem significância estatística, porém ocorreu efeito significativo a 15% de probabilidade, com efeito de regressão linear, porém não considerado neste estudo. Em relação à massa seca da parte aérea, de fevereiro a julho as plantas que receberam nitrogênio mantiveram uma taxa de crescimento maior que as não fertilizadas, obtendo, em junho, massa seca significativamente superior à testemunha (Tabela 4).

A massa de rizomas que somente foi avaliada em junho, na colheita, não diferiu entre os tratamentos, semelhantemente aos dados obtidos por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987), que não constataram influência da adubação nitrogenada na massa de colmos e rebolos subterrâneos da cultura em nenhuma época avaliada. Deve-se dar ênfase à importância de se avaliar a massa de rizomas na cultura da cana-de-açúcar, em estudos do sistema radicular, tendo em vista a quantidade expressiva de massa representada por esse compartimento, até mesmo superior à de raízes.

A massa de raízes apresentou padrão de crescimento semelhante ao ocorrido na Usina Santa Adélia, com aumento de outubro a fevereiro, coincidindo com o período de condições climáticas favoráveis, e diminuindo dessa época até a colheita, provavelmente devido à morte de raízes causada pelo déficit hídrico, porém sem comprometer o crescimento da parte aérea da cultura.

No experimento da Usina São Luiz, em um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico, a influência da fertilização nitrogenada de plantio foi mais acentuada do que na Usina Santa Adélia, em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico, com resposta linear na produtividade de colmos, que foi de 134, 142, 139 e 141 t ha⁻¹ para a testemunha e doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Assim como na USA, o maior acúmulo de massa na USL ocorreu de outubro a fevereiro (Figura 10), que representa a fase de maior crescimento da cana-de-açúcar.

Entretanto, diferentemente da área da USA, na USL mesmo após o período de máximo crescimento, os tratamentos fertilizados com nitrogênio continuaram seu desenvolvimento, enquanto a testemunha (sem N mineral) praticamente não aumentou a massa entre fevereiro e junho (Figura 10). Isso pode ter ocorrido pela maior massa de raízes em fevereiro nos tratamentos fertilizados, diminuindo os efeitos do déficit hídrico na fase seguinte, assim como maior área foliar, que pode ter favorecido a interceptação da energia luminosa nesse período em que a radiação solar diminuiu, favorecendo o crescimento da cana-de-açúcar nos tratamentos fertilizados.

Figura 10 - Fitomassa seca de raízes e da parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) no ciclo da cana-planta em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina São Luiz. As barras representam o erro padrão da média para n=4

Também se realizou estudo da relação entre a massa de raízes nas épocas de amostragens e água armazenada no solo (BRITO, 2007, dados não publicados^{*1}). De modo semelhante ao ocorrido na USA, constatou-se relação direta entre o armazenamento de água no solo até a profundidade de 0,6 m e a massa de raízes nessa mesma camada. Em outubro de 2005, havia 77 mm de água armazenada no solo nos primeiros 0,6 m, época em que coincidiu com a menor massa de raízes encontrada no ciclo da cana-planta (Figura 11). À medida que as chuvas se tornaram mais constantes, houve um incremento no armazenamento de água no solo, alcançando um máximo de 148 mm no dia 22 de dezembro de 2005. Em janeiro de 2006 as precipitações foram menos abundantes, conforme pode ser verificado na Figura 3, que causou uma redução no armazenamento de água no solo, atingindo 88 mm, porém voltando a aumentar à medida que as precipitações se restabeleceram. Em fevereiro de 2006 foi encontrada a maior massa de raízes do ciclo da cana-planta, assim como uma quantidade relativamente grande de água armazenada no solo, que decresceu até junho, assim como a massa do sistema radicular (Figura 11).

^{*1} Informação pessoal

Figura 11 - Armazenamento de água nos primeiros 0,6 m do solo (mm) e massa de raízes seca (kg ha⁻¹) no ciclo da cana-planta na Usina São Luiz. Pirassununga/SP

Em fevereiro de 2005 a massa de raízes encontrada na USL, na média das quatro doses de N, foi de 4.960 kg ha⁻¹, frente a 6.680 kg ha⁻¹ encontrada na USA nesse mesmo período. Essa diferença, de cerca de 1.700 kg ha⁻¹, pode ser explicada pelo déficit hídrico ocorrido na USL em janeiro de 2006, que acarretou diminuição do armazenamento de água (atingindo 88 mm), podendo ter favorecido a morte parcial das raízes da cana-de-açúcar nesse período. Diversos autores associam a dinâmica de desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar à disponibilidade de água no solo (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005; BARAN et al., 1974, VASCONCELOS, 2002).

Acúmulo de nitrogênio na parte aérea e sistema radicular

O acúmulo de nitrogênio na parte aérea foi favorecido em todas as épocas pela fertilização nitrogenada de plantio (Tabela 6). O acúmulo foi favorecido pelo aumento da massa de material seco em função das doses de N (Tabela 5), tendo em vista que a concentração de nitrogênio não foi influenciada pela fertilização nitrogenada (dados não apresentados).

Tabela 6 - Estoque de nitrogênio nas raízes e na parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca) em função da fertilização nitrogenada de plantio. Pirassununga/SP

Dose de N	Outubro de 2005		Fevereiro de 2006		Junho de 2006		
	R	PA	R	PA	R	RIZOMA	PA
kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹			
0	12	66	21	122	6	19	132
40	3	86	28	116	12	14	154
80	5	104	25	142	11	32	225
120	3	91	34	158	12	20	192
Média	6 (6)	87 (94)	27 (17)	135 (83)	10 (5)	21	176 (95)
CV (%)	65	21	35	19	33	47	31
R² RL	0,61***	0,59**	NS	0,82**	0,53**	NS	0,62**
R² RQ	0,81***	0,95**	NS	NS	NS	NS	NS

R = raízes; PA = parte aérea

*** e ** significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ^{NS} = não significativo. Os números entre parênteses representam a porcentagem de N acumulado nas raízes e parte aérea, em cada época

Em outubro, as doses de nitrogênio favoreceram o acúmulo deste nutriente na parte aérea em detrimento das raízes, que apresentou menor acúmulo de N nos tratamentos fertilizados, devido à menor massa de raízes encontrada nesses tratamentos (Tabela 5). Ou seja, mesmo uma menor massa de raízes nos tratamentos fertilizados foi capaz de suprir a demanda da parte aérea por esse nutriente. Em fevereiro o acúmulo de nitrogênio nas raízes não foi influenciado pela adubação nitrogenada de plantio, ocorrendo efeito favorável no acúmulo de nitrogênio nas raízes, em função das doses de N, somente em junho.

Na USL o acúmulo de N nas raízes, na média das doses, foi de 6, 27 e 10 kg ha⁻¹ aos 7, 12 e 16 meses após o plantio, respectivamente, e 21 kg ha⁻¹ no rizoma na colheita. Os resultados foram pouco inferiores aos da USA, de 7, 38 e 11 kg ha⁻¹ de N nas raízes aos 6, 10 e 15 meses, respectivamente, e 34 kg ha⁻¹ de N nos rizomas na colheita, devido à maior massa de raízes e rizomas encontrada na USA. A quantidade de N acumulada nas raízes e rizomas na colheita da USL foi de 31 kg ha⁻¹ de N, superior às quantidades observadas por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987), que encontraram valores da ordem 16 a 22 kg ha⁻¹ de N acumulado no sistema radicular, contabilizando raízes, colmos e rebolos subterrâneos, sem influência da fertilização nitrogenada e época de avaliação (aos 3, 6, 11 e 16 meses após o plantio).

O acúmulo de nitrogênio na parte aérea na colheita da USL apresentou aumento linear para as doses de N, variando de 132 (testemunha) a 225 kg ha⁻¹ de N (80 kg ha⁻¹ N) (Tabela 6). Sampaio, Salcedo e Bettany (1984) obtiveram acúmulo de nitrogênio na parte aérea de 180 kg ha⁻¹, sem efeito das doses de nitrogênio na produtividade de colmos e na acumulação de nitrogênio. Por outro lado, os trabalhos de Bologna-Campbell (2006) e Trivelin et al. (2002) evidenciaram aumento linear no N total na parte aérea e sistema radicular (raízes e rizomas) em função das doses de nitrogênio, corroborando com os dados obtidos na área da USL na colheita.

Há evidências da existência de efeito residual da adubação nitrogenada de cana-de-açúcar de um ciclo agrícola (ano-safra) para outro. Vitti et al. (2007), em NEOSSOLO QUARTZARÊNICO constataram que as doses de nitrogênio proporcionam efeito linear altamente significativo na produtividade de colmos da segunda soca e que esse efeito se manteve na terceira soca, mesmo sendo aplicada única dose de nitrogênio após o terceiro corte. Também observaram que a adubação nitrogenada e o conteúdo de nitrogênio e enxofre do sistema radicular correlacionam-se positivamente com a produtividade da cana-de-açúcar na safra seguinte. Diante dessas constatações, infere-se que o maior acúmulo de nitrogênio no sistema radicular na área da USA em relação à USL pode favorecer a produtividade de colmos no ciclo agrícola subsequente.

3.4 Conclusões

O desenvolvimento radicular e da parte aérea de cana-de-açúcar respondeu diferentemente à fertilização nitrogenada de plantio em função das condições ambientais e edáficas. No LVAe o crescimento de raízes, da parte aérea e a produtividade de colmos foram influenciados pela adubação nitrogenada de plantio, enquanto que no LVd, com grande quantidade de nitrogênio incorporado ao solo por resíduos culturais, a influência das doses de N nesses parâmetros foi mínima.

Em cana-planta de ano e meio a fase de maior desenvolvimento de raízes foi de outubro a fevereiro, com diminuição da massa de raízes de fevereiro a julho (colheita), porém sem influenciar o desenvolvimento da parte aérea.

No ciclo da cana-planta o maior acúmulo de nitrogênio no sistema radicular ocorreu em fevereiro, diminuindo desse período até a colheita, devido à diminuição da massa de raízes.

A morte e decomposição de raízes é uma fonte de carbono e nitrogênio para o solo.

O crescimento de raízes de cana-de-açúcar está diretamente relacionado ao armazenamento de água no solo.

Referências

AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta – doses e fracionamento. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 6, n. 5, p. 26-33, 1986.

ALBUQUERQUE, G.A.C.; MARINHO, M.L. Adubação na região Norte-Nordeste. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord). **Nutrição de adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. p. 267-286.

BOLOGNA-CAMPBELL, I.R. **Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BRITO, A.S. **Balanco de água em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

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.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SANTA, M.B.M. (Ed.). **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985. p. 47-49.

CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 8, n. 3/4, p. 24-41, 1990.

DILLEWIJN, C. van. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371 p.

DREW, M.C. Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. **New Phytologist**, Lancaster, v. 75, n. 3, p. 479-490, 1975.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma de áreas com cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 32-36, 2007.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 255-289.

KORNDÖRFER, G.H.; VALLE, M.R.; MARTINS, M.; TRIVEIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana-planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 23-26, 1997.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: POTAFÓS, 1989. 201 p.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, L.A.; LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I: Eficiência de utilização da uréia (^{15}N) em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III: conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 425-431, 1987.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

SOUZA, F.S.; FARINELLI, R.; ROSOLEM, C.A. Desenvolvimento radicular do algodoeiro em resposta à localização do fertilizante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 387-392, 2007.

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.

THORBURN, P.J.; DART, I.K.; BIGGS, I.J.; BAILLIE, C.P.; SMITH, M.A.; KEATING, B.A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 201-209, 2003.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita:** crua mecanizada e queimada manual. 140 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2002.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C., PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E., FRANCO, H.C.J.F. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Viçosa, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

ZAMBELLO JUNIOR, E.; AZEREDO, D.F. Adubação na região Centro-Sul. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição de adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. p. 289-313.

4 PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR RELACIONADA À ADUBAÇÃO NITROGENADA, AO CRESCIMENTO DE RAÍZES E AO DÉFICIT HÍDRICO

Resumo

O conhecimento da dinâmica de desenvolvimento de raízes em solos com características distintas e sob manejos diferenciados de fertilizações pode ser uma ferramenta para minimizar a queda de produtividade entre os cortes, assim como, aumentar a produtividade da cana-de-açúcar. Objetivou-se com o trabalho avaliar a massa de raízes em função da fertilização nitrogenada de plantio e soqueira, verificando sua influência na produtividade de colmos e açúcar. Foram conduzidos três experimentos, um em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (LVAe) e outro em LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd) (ambos de textura média) e um em LATOSSOLO VERMELHO eutrófico (LVe) argiloso, com a variedade SP81 3250. Na cana-planta os tratamentos constaram de doses de nitrogênio (N) de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ e uma testemunha (sem N mineral), em blocos ao acaso, com quatro repetições. Na cana-soca cada parcela da cana-planta foi dividida em quatro subparcelas, às quais foram aplicadas doses de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ N e uma testemunha. No 1º corte o sistema radicular foi avaliado em todos os tratamentos nos três solos. No 2º corte, o sistema radicular foi avaliado somente nas subparcelas dos tratamentos de plantio testemunha e 120 kg ha⁻¹ N, no LVAe e LVd. Para o experimento no solo LVe, somente nas subparcelas testemunha e 150 kg ha⁻¹ N das parcelas principais testemunha e 120 kg ha⁻¹ N foi avaliado o sistema radicular da cana soca. As doses de N no plantio favoreceram o crescimento de raízes e a produtividade de colmos no LVAe e no LVe, e o acúmulo de sacarose no LVd. As doses de N na soqueira favoreceram a produtividade de colmos e açúcar nos três solos. No 1º corte, foi obtida maior produtividade de colmos (152 t ha⁻¹) e menor massa de raízes (1,35 t ha⁻¹) no LVe em relação ao LVAe e LVd (139 e 145 t ha⁻¹ de colmos e 2,5 e 2,4 t ha⁻¹ de raízes, respectivamente). Em relação ao 1º corte, a produtividade do 2º corte se manteve estável no LVd (120 t ha⁻¹) e diminuiu drasticamente no LVe (80 t ha⁻¹). Esse fato foi devido à pequena massa de raízes no LVe no 1º corte, tendo em vista que nas duas áreas ocorreu acentuado déficit hídrico meses antes e após o 1º corte. A adubação nitrogenada de soqueira favoreceu o crescimento de raízes somente no LVe, porém a massa diminuiu do 1º para o 2º corte, enquanto que no LVAe e no LVd a massa permaneceu constante. Em experimentos com cana-de-açúcar é aconselhável avaliar o sistema radicular para entender os efeitos no crescimento de parte aérea e produtividade da cultura.

Palavras-chaves: Sistema radicular; Cana-planta; Cana-soca; Nitrogênio

Productivity of the sugarcane related to the nitrogen, growth of roots and water deficit

Abstract

The knowledge of development dynamics of roots in soils, with different characteristics and under differentiated fertilization management, can be a tool to minimize the loss of productivity among the harvests as well as increasing the productivity of the sugarcane. This work aimed to evaluate the mass of roots related to the fertilization-N applied at planting and after the first harvest, verifying their influences in the stalk and sugar yield. Three experiments were conducted in a randomized blocks design, with four replications, in three different soils, a Typic Eutruxox (TE) and an Arenic Kandistult (AK) (both of medium texture), and a clayey Rhodic Eutruxox (RE), with the sugarcane cultivar SP81 3250. Treatments for the cane-plant were nitrogen (N) rates of 0, 40, 80 and 120 kg ha⁻¹ N. In the first ratoon crop each plot of cane-plant was split in four subplots to which rates of 0, 50, 100 and 150 kg ha⁻¹ of N was applied. In the first harvest, the root system was evaluated in all of the treatments applied on the three soils (TE, AK and RE), whereas in the second harvest the root system was evaluated only for the subplots of the planting treatments control and 120 kg ha⁻¹ N in TE and AK. For the experiment in the RE soil, only control and 150 kg ha⁻¹ N subplots of the control and 120 kg ha⁻¹ N main plots had the ratoon root system evaluated. The N rates applied to the cane-plant favored the roots growth and crop productivity in TE and RE, and the sucrose accumulation in AK. The rates of fertilizer-N in the ratoon favored the productivity of stalks and sugar yield in the three soils. In the first harvest, it was obtained a larger productivity of stalks (152 t ha⁻¹) and a smaller mass of roots (1.35 t ha⁻¹) in RE in relation to TE and AK (139 and 145 t ha⁻¹ of stalks and 2.5 and 2.4 t ha⁻¹ of roots, respectively). The productivity of the second harvest was similar to that of the first harvest in AK (120 t ha⁻¹), but it decreased drastically in RE (80 t ha⁻¹), as a consequence of the small mass of roots in RE in the first harvest, attributed to a high water deficit in the months prior to and after harvest. Nitrogen fertilization applied after the first harvest influenced root growth only in the RE soil; however the mass of roots decreased from the first to the second harvest while in the TE and AK soils the root mass remained constant. In experiments with sugarcane is advisable to evaluate the root system in order to understand the effects in the above ground part growth and crop yield.

Keywords: Root system; Cane-plant; Ratoon crops; Nitrogen

4.1 Introdução

4.1.1 Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar

O nitrogênio constitui uma fração de apenas 1% da matéria seca total na cana-de-açúcar madura e, ainda assim, sua importância é tão grande quanto a do carbono, hidrogênio e oxigênio, que juntos perfazem 90% da matéria seca (VAN DILLEWIJN, 1952, apud CARNAÚBA, 1990).

As respostas da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em termos de produtividade, são bastante variáveis para a cana-planta e relativamente homogêneas para a soqueira (CARNAÚBA, 1990).

Muitos foram os trabalhos realizados em cana-planta que não obtiveram resposta em produtividade de colmos às doses de N. Autores indicaram que somente estudos de medições de efeitos, em que se avaliam as produtividades de colmos relacionadas às doses de N, não são totalmente esclarecedores, e sugerem que estudos de causa-efeito como os relacionados à área de mineralização da matéria orgânica e fixação biológica do N devem ser desenvolvidos, visando elucidar a questão da resposta da cana-planta ao N (MORELLI et al., 1997).

O elevado erro experimental associado a estudos de adubação conduzidos em condições de campo tem feito que trabalhos com pequenas respostas em produção, em razão da adubação nitrogenada, não atinjam significância estatística (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). Esses autores apresentaram resultados não publicados de Penatti e Cantarella, 74 experimentos em campo e observaram que a maioria deles não apresentava, individualmente, resposta significativa à adubação nitrogenada. Porém, quando analisados conjuntamente, mostraram uma clara tendência de resposta, com dose econômica por volta de 75 kg ha^{-1} de N para as condições Centro Sul. Marinho e Barbosa (1996) analisaram diversos trabalhos desenvolvidos na região Nordeste do Brasil e evidenciaram que, somente 44% de 107 trabalhos apresentaram resposta significativa à adubação nitrogenada quando analisados isoladamente. Porém, quando analisados conjuntamente, evidenciaram resposta altamente significativa da cana-planta à fertilização nitrogenada.

A cana-de-açúcar é uma cultura eficiente em aproveitar o N do solo, devido ao longo ciclo e ao sistema radicular abundante. Grande número de estudos com fertilizantes marcados com ^{15}N tem mostrado que a maior parte do N absorvido pela planta vem do solo (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007), tendo em vista que a contribuição dos fertilizantes nitrogenados em relação ao N total absorvido pela cana é baixo, variando de 10 a 16%, segundo diversos trabalhos encontrados na literatura.

A eficiência do uso do N pela cana-de-açúcar, expressa em termos de porcentagem do N aplicado ao solo como fertilizante e absorvido pela planta, é baixa e pode variar de 10 a 40%, sendo ligeiramente maior em cana-planta, de 34 a 63%, devido à menor dose aplicada em relação às soqueiras, segundo diversos trabalhos citados por Cantarella, Trivelin e Vitti (2007).

Um das principais hipóteses para a falta de resposta da cana-planta à fertilização nitrogenada refere-se à grande quantidade de N nativo do solo que é mineralizado da matéria orgânica após as operações de preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar, principalmente devido ao aumento da aeração, que favorece a mineralização microbológica. Salcedo, Sampaio e Alves (1985) avaliaram a mineralização de C e N em um Podzólico Vermelho Amarelo latossólico álico, de textura arenosa, durante o ciclo da cana-planta, e obtiveram estimativas de $394 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N mineralizado até a profundidade de 0,6 m. Segundo os autores, a necessidade da cana-de-açúcar poderia ser atendida somente pela mineralização do N orgânico desse solo, justificando, assim, a falta de resposta à fertilização nitrogenada obtida no trabalho de Sampaio, Salcedo e Bettany (1984). Araújo, Sampaio e Salcedo (2001) mediram novamente as taxas de mineralização de C e N nesse solo, porém em amostras coletadas em um mesmo local ao longo de 10 anos de cultivo de cana e obtiveram média global de produção de N mineralizado de 26, 17 e $15,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de solo para as profundidades de 0 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm, respectivamente, representando em torno de 4% do N total do solo em cada camada. Utilizando um modelo para estimar a quantidade de N mineralizado ao longo de um ano, obtiveram 339 kg ha^{-1} de N mineralizado até 0,6 m, muito próximo aos resultados obtidos no ciclo da cana-planta, levando os autores a concluírem não haver redução no potencial de mineralização

daquele solo ao longo do período de cultivo de cana-de-açúcar, mesmo depois de o mesmo ter sido cultivado por 10 anos consecutivos, sem fertilização nitrogenada.

Thorburn et al. (2003) verificaram redução na quantidade de nitrogênio mineral no perfil do solo, do período de pré-plantio para os das socas sucessivas. Os autores associaram o fato à ausência de resposta à adubação nitrogenada na cana-planta, que teve à sua disposição cerca de 200 kg ha⁻¹ de N até 2,0 m de profundidade, e às respostas nas três socas sucessivas, quando as reservas de N mineral do solo se esgotaram. Os autores não constataram neste experimento entradas de N pela fixação biológica.

4.1.2 A adubação nitrogenada, o déficit hídrico e o crescimento de raízes

O estresse pela falta de água causa impacto significativo no crescimento da cana-de-açúcar, produtividade e qualidade da cana (WIEDENFELD, 1995). Quantidade suficiente de água é requerida durante a emergência, perfilhamento e estabelecimento da cultura, mas o consumo de água durante esses estádios é baixo comparado ao de máximo crescimento da cana (GASCHO, 1985 apud WIEDENFELD, 2000). Aumentando os níveis de estresse hídrico há queda na produtividade causada pela diminuição na taxa de alongação dos colmos (THOMAS et al., 1978, apud WIEDENFELD, 2000).

Respostas da cana-de-açúcar ao N têm sido estudadas extensivamente, mas muito pouco é conhecido sobre a interação entre a fertilização nitrogenada e a disponibilidade hídrica (WIEDENFELD, 2000). Diversos autores (THOMAS; OERTHER, 1976; BOSE; THAKUR, 1977; apud WIEDENFELD, 2000) sugerem que a taxa de crescimento da cana-de-açúcar é mais afetada pela disponibilidade de água do solo do que pelas doses de nitrogênio. Geralmente, quando o estresse hídrico aumenta, a resposta à fertilização nitrogenada diminui (INGRAM; HILTON, 1986; PARASHAR et al., 1978; REDDY et al., 1978; WIEDENFELD, 1995; apud WIEDENFELD, 2000).

Wiedenfeld (2000) constatou que reduções na produtividade foram mais freqüentes e severas quando o estresse hídrico ocorreu no período de maior demanda evapotranspirativa e máximo crescimento vegetativo, porém seu estudo não conseguiu

limitar a resposta ao N causada pelo déficit hídrico, provavelmente, pela capacidade de compensação da cana-de-açúcar aos fatores limitantes.

Poucos trabalhos com cana-de-açúcar avaliaram a dinâmica de crescimento de raízes em função do manejo da fertilização nitrogenada. Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987) constataram aumento na massa de raízes com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N no plantio em comparação à testemunha nas condições do nordeste brasileiro, porém sem evidenciar aumento na produtividade de colmos nesse corte. Recentemente, trabalhos desenvolvidos em condições de vaso constataram maior crescimento de raízes e maior acúmulo de N no sistema radicular e na parte aérea em função das doses de N de plantio (TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2006), assim como maior acúmulo de macronutrientes no sistema radicular (FRANCO et al., 2007a). Vitti et al. (2007) constatou maior crescimento de raízes e maior produtividade de colmos em uma 2ª soca em função de doses de N aplicadas no início do ciclo agrícola, e o efeito das doses se mantiveram até a 3ª soca, mesmo tendo sido aplicada dose única de N após o corte da 2ª soca. O autor atribuiu esse efeito residual à maior reserva de N e S no sistema radicular no final do ciclo da 2ª soca, proporcionado pela adubação realizada no início do ciclo.

Portanto, existem indícios de que a adubação nitrogenada favorece o crescimento de raízes e a absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, promovendo maior produtividade de colmos, que pode ainda se estender para os próximos ciclos devido ao melhor desenvolvimento do sistema radicular.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a massa de raízes e a produtividade de colmos e açúcar no 1º e 2º corte, em função de doses de N aplicadas no plantio e após o 1º corte, assim como verificar algum tipo de relação entre a massa de raízes e a produtividade do ciclo agrícola subsequente, em três tipos de solos representativos do Estado de São Paulo.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Local e cultivar

Os experimentos foram desenvolvidos em áreas comerciais de cana-de-açúcar nos municípios de Jaboticabal/SP (Usina Santa Adélia - USA), Pirassununga/SP (Usina São Luiz - USL), e Pradópolis/SP (Usina São Martinho - USM), no ciclo agrícola de cana-planta (2005/2006) e cana-soca (2006/2007). Foi utilizada a cultivar SP 81 3250 nas três áreas experimentais.

4.2.2 Caracterização dos solos

Em Pirassununga/SP o solo é um LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (LVAe), em Jaboticabal/SP um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (LVd) e em Pradópolis/SP um LATOSSOLO VERMELHO eutrófico (EMPRAPA, 1999), referentes a um Typic Eustrustox, Arenic Kandistults e Rhodic Eustrustox, respectivamente, pela Soil Taxonomy. A caracterização química e física dos solos (Tabelas 1, 2 e 3) foi realizada a partir de amostras coletadas em diferentes profundidades, na parede de trincheira aberta na área de bordadura dos experimentos, onde foram coletadas amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo e amostras deformadas para análise química (RAIJ et al., 2001) e granulométrica, pelo método da pipeta (GEE; OR, 2002).

Tabela 1 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO AMARELO eutrófico (Typic Eustrustox). Pirassununga/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,2 m)	7,2	20	10	1,9	43	11	0	8	63,9	87	260	1641
BA (0,44 m)	6,5	8	1	2,6	7	3	0	11	23,6	53	269	1634
BW ₁ (0,81 m)	6,9	6	2	2,5	11	4	0	10	27,5	64	248	1445
BW ₂ (0,81+)	6,4	8	1	1,8	18	7	0	11	37,8	71	231	1373

* ρ = densidade do solo

Tabela 2 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico (Arenic Kandiustults). Jaboticabal/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,15 m)	6,3	23	10	3,6	18	13	0	17	51,6	67	285	1305
A ₂ (0,37 m)	6,0	16	11	2,2	9	5	2	18	34,2	47	296	1460
BA (0,56 m)	5,1	11	3	1,2	2	1	8	31	35,2	12	347	1391
BW ₁ (0,96 m)	5,6	8	1	0,9	3	1	3	20	24,9	20	371	1208
BW ₂ (0,96+)	5,9	7	1	3,5	2	1	0	9	15,5	42	367	1244

* ρ = densidade do solo

Tabela 3 - Caracterização química e física do LATOSSOLO VERMELHO eutrófico (Rhodic Eutrustox). Pradópolis/SP

Horizonte	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	T	V	Argila	ρ^*
diagnóstico	H ₂ O	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				mmol _c kg ⁻¹			%	g kg ⁻¹	kg m ⁻³
Ap (0,37 m)	5,4	30	36	1,7	29	9	1	59	98,7	40	671	1299
Bw ₁ (0,60 m)	5,5	15	6	0,2	22	6	0	30	58,2	48	707	1330
Bw ₂ (0,98 m)	6,0	10	2	0,2	20	5	0	23	48,2	52	692	1318
Bw ₃ (0,98+)	6,8	8	1	0,2	16	4	0	19	39,1	51	648	1375

* ρ = densidade do solo

4.2.3 Preparo do solo e instalação

O preparo do solo foi convencional na USA e USL e reduzido na USM. Na Usina Santa Adélia a seqüência de operações foi a aplicação de herbicida para dessecação da soqueira, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico, aração, gradagem intermediária e sulcação. Na Usina São Luiz a seqüência de operações foi a passagem de grade aradora para eliminação da soqueira, subsolagem, aplicação de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico e 2 t ha⁻¹ de gesso agrícola, grade aradora, grade intermediária e sulcação. Na USM foi realizada dessecação da soqueira antiga, subsolagem e sulcação, não sendo aplicado calcário e gesso tendo em vista que a análise química de terra antes da instalação não evidenciar necessidade.

Os sulcos foram abertos com aproximadamente 0,35 m de profundidade, foram utilizadas 15 gemas viáveis por metro, além de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 de K₂O, na forma de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Antes das mudas serem cobertas com solo (cobrição das mudas) foi aplicado inseticida e nematicida. As mudas foram cobertas com uma camada de 0,1 m de terra.

O plantio foi realizado em 22/02, 03/03 e 05/04/2005; a 1ª colheita em 06/06, 07/08 e 10/07/2006 e a 2ª colheita em 20/06, 10/07 e 15/08/2007 na USL, USM e USA, respectivamente.

4.2.4 Delineamento experimental e tratamentos

No ciclo da cana-planta, o delineamento experimental foi em blocos completos ao acaso com quatro tratamentos, referente às doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ N aplicado na forma de uréia no sulco de plantio, além de uma testemunha (sem N mineral), com quatro repetições. Cada parcela experimental foi constituída por 48 sulcos espaçados em 1,5 m, com 15 m de comprimento, totalizando 1.080 m² por parcela.

No ciclo da cana-soca o delineamento experimental foi em parcelas subdivididas, sendo as parcelas as doses de N-plantio e as subparcelas as doses de N-soqueira, de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ N e uma testemunha (sem N mineral) compreendendo, portanto um fatorial 4x4 (4 doses de N-plantio e 4 doses de N-soqueira), com quatro repetições. No ciclo da cana-soca cada parcela experimental foi constituída de 12 sulcos espaçados em 1,5 m, com 15 m de comprimento, totalizando 270 m² por parcela.

O sistema radicular (raízes e rizomas) foi avaliado em todos os tratamentos na cana-planta. Na soqueira as avaliações de raízes foram feitas nos tratamentos testemunha, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ N no LVAe e LVd; testemunha e 150 kg ha⁻¹ N no LVe associado aos tratamentos de N-plantio: testemunha (sem N mineral) e 120 kg ha⁻¹ N.

Após o corte da cana-planta, os fertilizantes foram aplicados manualmente, com distribuição mais homogênea possível, em um lado da soqueira da cana-de-açúcar, sem incorporação. Na USA e USL a fonte de nitrogênio na cana-soca foi o Sulfato de

Amônio (21% de nitrogênio e 24% de enxofre), fornecendo 57, 114 e 171 kg ha⁻¹ de enxofre (S) para os tratamentos 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Na USM foi utilizada mistura de Sulfato de Amônio e Nitrato de Amônio (32%N), que forneceu 57 kg ha⁻¹ de S em todos os tratamentos que receberam os fertilizantes nitrogenados. Também foi aplicado, nas três áreas, 150 kg ha⁻¹ de óxido de potássio (K₂O) na forma de cloreto de potássio (60% de K₂O). Na área da USL foi aplicado 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfosfato triplo (40%P₂O₅), juntamente com os demais fertilizantes, devido aos baixos teores de P evidenciados na análise de fertilidade do solo realizada após o 1º corte.

4.2.5 Evapotranspiração e balanço hídrico da cultura

Para a estimativa da evapotranspiração foram utilizados dados das estações meteorológicas automáticas instaladas próximo às áreas dos experimentos.

Várias aproximações são disponíveis para estimar o uso de água pelas culturas. O método prático mais amplamente aceito deriva a evapotranspiração (ET_c) de culturas crescendo em condições adequadas de nutrição, suprimento de água em ausência de pragas e doenças, da evapotranspiração de referência usando (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005):

$$ET_c = K_c \cdot ET_0,$$

O K_c é um coeficiente empírico de cultura, ou coeficiente da cultura; ET₀ é calculado usando a equação de Penman-Monteith, que atualmente é o método padrão da FAO (ALLEN et al., 1994; ALLEN et al., 1998, apud PEREIRA; ANGELOCCI, SENTELHAS, 2002):

$$ET_p = \frac{0,408 s (R_n - S) + [\ell 900 U_2 (e_s - e_a) / T + 273]}{s + \ell (1 + 0,34 U_2)}$$

Onde: R_n é a radiação líquida total diária (MJ m⁻² d⁻¹); G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); $\ell = 0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ é a constante psicométrica; T é a temperatura média do ar (°C); U₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s é a pressão de saturação de

vapor (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa), e s é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura foram utilizados os índices K_c para os diversos estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar, descritos em Doorenbos e Kassan (1994), levando-se em consideração as diferenças de crescimento da parte aérea no ciclo da cana-planta e cana-soca. Entretanto, o K_c de 1,05 no período de máximo crescimento foi substituído pelo K_c de 1,25 segundo modificações propostas por Allen et al. (1998) e confirmadas por Inman-Bamber e McGlinchey (2003) para a cana-de-açúcar.

A partir dos dados da evapotranspiração da cultura e pluviométricos coletados nas áreas experimentais (USA e USL) e próximo da área experimental (USM), foi calculado o balanço hídrico de cultura utilizando planilhas eletrônicas (ROLIM; SENTELHAS; BARBIERI, 1998).

A partir da curva de retenção de água no solo para os diferentes horizontes pedológicos da USA, obtidas por Brito (2006), foi calculada a CAD (capacidade de água disponível):

$$\text{CAD: } (\theta_{cc} - \theta_{PMP}) \cdot Z$$

Onde θ_{cc} é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) na capacidade de campo (10 kPa); θ_{PMP} é a umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) no ponto de murcha permanente (1.500 kPa); Z é a profundidade efetiva do sistema radicular da cana, de 100 cm (ALFONSI; PEDRO JR; ARRUDA, 1990 apud PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), obtendo-se uma CAD de 72 mm para a área da USA. Como não foram obtidas as curvas de retenção de água para as áreas da USL e da USM, também foi considerada uma CAD de 72 mm para esses dois solos.

4.2.6 Avaliações do sistema radicular

Para a amostragem de raízes foi utilizada sonda em aço inox, com 0,055 m de diâmetro interno, até a profundidade de 0,6 m, em diversos pontos a partir do centro da touceira de cana, com o objetivo de representar da melhor maneira possível a distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar.

Na colheita da cana-planta, as amostras foram retiradas de centro a centro da entrelinha, sendo duas amostras coletadas sobre a linha de cana, duas a 0,3 m da linha e duas a 0,6 m (cada uma de um lado da linha), de modo que essas seis amostras representem todo perfil de solo explorado pelo sistema radicular (Figura 1 a). Na colheita da cana-soca, as amostras foram retiradas de centro a centro da linha de cana, sendo coletadas amostras sobre a linha da cana (onde há maior quantidade de raízes), a 0,30 m da linha (quantidade intermediária de raízes) e a 0,60 m da linha (menor quantidade de raízes), representando todo o perfil de solo explorado por duas ruas de cana-de-açúcar (Figura 1 b).

A separação das raízes do solo foi realizada no campo, utilizando peneiras com malha de 2 mm e no laboratório as amostras de raízes foram lavadas em água corrente sobre peneiras com malha de 1 mm, sendo posteriormente secas em estufa a 65° C, durante 48 h, até a obtenção da massa constante. A massa de matéria seca foi obtida em balança de precisão de 0,01 g.

Embora as amostragens tenham sido realizadas nas camadas de 0-0,3 e 0,3-0,6 m na cana-planta e 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m na soca, neste estudo a massa de raízes secas por hectare foi calculada até a camada de 0,6 m.

Figura 1 - Esquema de amostragem do sistema radicular com sonda no ciclo da cana-planta (a) e cana-soca (b)

Para o cálculo da massa de raízes por hectare considerou-se a densidade de raízes em cada local amostrado e em cada profundidade (dividindo-se a massa de raízes obtida pelo volume amostrado pela sonda) e multiplicou-se essa densidade pelo volume de solo que esse local representa, em termos de $\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$. Assim, obteve-se a massa de raízes em cada local (A, B e C) e em cada profundidade, expressos em kg ha^{-1} . A fórmula abaixo foi utilizada para obter a massa de raízes em cada profundidade (0-0,3 e 0,3-0,6 m na cana-planta e 0-0,2, 0,2-0,4 e 0,4-0,6 m na soca) e a soma da massa de raízes em todas profundidades resultou na massa de raízes por hectare, até 0,6 m:

$$\text{MR} = [(M_A/2)/V_s) \times (V_A)) + ((M_B/2)/V_s) \times (V_B)) + ((M_C/2)/V_s) \times (V_C))] \times 1000$$

Onde:

MR = massa de raízes, em kg ha^{-1} ;

M_A , M_B e M_C = massa de raízes (g) obtida no local A, B e C, respectivamente;

V_s = volume amostrado pela sonda ($0,713 \text{ dm}^3$ na cana-planta e $0,475 \text{ dm}^3$ na soca);

V_A = volume de solo ($\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$) representado pela faixa amostrada A, obtido por (a);

V_B e V_C = volume de solo ($\text{dm}^3 \text{ ha}^{-1}$) representado pela faixa amostrada B e C, obtido por (b);

$$(a) V_A = (0,3 \text{ m}_{\text{largura}} \times 0,3 \text{ m}_{\text{profund}} \times 6667 \text{ m}_{\text{comprim}}) \times 1.000 = 600.000 \text{ dm}^3$$

$$(b) V_{B \text{ e } C} = (0,6 \text{ m}_{\text{largura}} \times 0,3 \text{ m}_{\text{profund}} \times 6667 \text{ m}_{\text{comprim}}) \times 1.000 = 1.200.000 \text{ dm}^3$$

Para amostragem de rizomas foram abertas pequenas trincheiras na projeção do sulco, de 1 m de comprimento, coletando-se toda massa de rizomas e separando as raízes e o solo aderido nos rizomas, que foram lavados em água corrente e secos em estufa a 65° C durante cinco dias, até massa constante, para posterior obtenção da massa de matéria seca.

4.2.7 Produtividade de colmos e açúcar

A colheita da cana-planta e cana-soca foi realizada mecanicamente, sem despalha a fogo, e a massa de colmos obtida em transbordo equipado com balança do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), de Piracicaba/SP.

Na cana-planta foram colhidos quatro eitos de quatro sulcos cada um, totalizando 16 sulcos de 15 m de comprimento por parcela, ou 360 m² dos 1.080 m² total das parcelas. Na cana-soca foram colhidos 4 sulcos de 15 m por parcela, ou 90 m² dos 270 m² total das subparcelas, nos mesmos locais onde foi realizada a colheita da cana-planta. Com a massa de colmos obtida em cada parcela procedeu-se o cálculo da produtividade de colmos por hectare.

Em cada parcela foram coletadas 10 canas seguidas no sulco, retirado o ponteiro e a palha e procedida análise tecnológica nos laboratório das respectivas Usinas.

4.2.8 Análise estatística

Foi realizada análise de variância com os dados da massa do sistema radicular, produtividade de colmos, teor de pol na cana e produtividade de açúcar. Quando o F foi significativo realizou-se análise de regressão visando obter o efeito das doses de N nos parâmetros avaliados.

No caso do sistema radicular na colheita da cana-soca da USM, composta somente por dois tratamentos (sem N ou 150 kg ha⁻¹ N, não quantitativos) quando o F foi significativo procedeu-se o Teste de Tukey para comparação das médias entre os tratamentos.

4.3 Resultados

4.3.1 Balanço hídrico climatológico

Cana-planta

No ciclo da cana-planta as precipitações concentraram-se no período do verão nas três áreas experimentais, especialmente de dezembro a março. Embora a temperatura e radiação solar tenham possibilitado elevada evapotranspiração potencial da cultura a partir do mês de agosto, o armazenamento de água no solo foi baixo nesse período e limitou a evapotranspiração, que somente ocorreu em níveis elevados a partir do mês outubro na USM, novembro na USL e dezembro na USA (Figura 2). Desses períodos até o mês de março de 2006 a evapotranspiração real da cultura foi muito próxima a potencial, devido às condições favoráveis de temperatura, radiação solar e disponibilidade hídrica, possibilitando o máximo crescimento da planta, período esse chamado de estágio de máximo crescimento da cana-de-açúcar.

Na USM a evapotranspiração real foi próxima da potencial por um período maior (de outubro a março) do que nas outras áreas, evidenciando um possível maior potencial produtivo da cultura nessa área, tendo em vista que coincidiu com o período de maior acúmulo de material vegetal da cana-de-açúcar.

O conhecimento isolado da evapotranspiração potencial e real, assim como, do déficit hídrico por todo ciclo da cana-planta pode não ser tão valioso como a avaliação desses parâmetros em determinados períodos de crescimento da cultura, tendo em vista que a cana-de-açúcar apresenta determinados estádios de crescimento bastante distintos. Em determinados estádios, como o de maturação, o déficit hídrico não apresenta influência tão marcante na produtividade, enquanto que em outros, como o estágio de máximo crescimento, déficits hídricos acentuados podem afetar significativamente a produtividade da cultura.

Figura 2 - Balanço hídrico climatológico das três áreas experimentais no ciclo agrícola da cana-plana. ETPc: Evapotranspiração potencial da cultura; ETRc: Evapotranspiração real da cultura; P: precipitação pluviométrica

No ciclo da cana-planta, o déficit hídrico foi de 611, 667 e 716 mm, respectivamente, na USL, USA e USM (Tabela 4), o que pode ser considerado elevado para a cana-de-açúcar. Entretanto, o déficit hídrico acumulado foi maior nos estádios de desenvolvimento inicial (devido às baixas precipitações no inverno) e no de maturação, que não apresenta efeitos expressivos na diminuição da produtividade. No estágio de máximo crescimento (de dezembro a março, em um total de 120 dias) foram observadas as maiores precipitações e o déficit hídrico foi baixo na USM (37 mm) e médio na USA e USL (78 e 105 mm, respectivamente). O baixo déficit hídrico nesse período, aliado às condições favoráveis de temperatura e radiação solar, possibilitaram um elevado crescimento vegetativo da cultura nesse estágio.

No estágio de máximo crescimento (estádio 2) a evapotranspiração real da cultura (ET_{Rc}) variou de 5,1 a 5,4 mm dia⁻¹, superior às evidenciadas nos estádios inicial (1) e final (3), quando a ET_{Rc} variou de 0,7 a 2,0 mm dia⁻¹ (Tabela 4). Ressalta-se que esses são valores médios de evapotranspiração em cada estágio, ao passo que foram obtidos dividindo-se a evapotranspiração total e real em cada estágio pela duração do mesmo, em dias. A evapotranspiração máxima verificada no ciclo da cana-planta foi, respectivamente, de 7,6; 7,4 e 6,7 mm dia⁻¹ na USA, USL e USM. Esses valores são próximos aos obtidos por Inmam-Bamber e McGlinchey (2003), de 8 e 7 mm dia⁻¹, respectivamente, na Austrália (região de Burdekin) e na Suazilândia, na África do Sul.

A partir de abril as precipitações praticamente cessaram nas três áreas experimentais (Figura 2). Como na USL a colheita foi realizada no início de junho, o déficit hídrico acumulado no estágio de maturação (113 mm), foi bastante inferior ao da USA e USM, de 226 e 311 mm, respectivamente, pelo fato de as colheitas terem sido mais tardias (em julho na USA e agosto na USM), favorecendo o secamento do solo. Esse déficit hídrico acentuado no estágio final do ciclo da cana-planta nas áreas da USA e USM podem prejudicar a brotação e o vigor da soqueira para o ciclo agrícola subsequente.

Tabela 4 - Balanço hídrico climatológico nas três áreas experimentais (USL, USA e USM) no ciclo agrícola da cana-planta, em três estádios de desenvolvimento da cultura

Estádios^{*1}	Nº de dias	Pluviosidade mm	Déficit^{*2}	ETPc^{*2} mm dia⁻¹	ETRc^{*2}
Usina Santa Adélia					
1	237	424	364	3,3	1,8
2	121	1079	78	6,0	5,4
3	101	20	226	3,1	0,9
Total (mm)	459	1522	667	1830	1163
Usina São Luiz					
1	280	668	392	3,4	2,0
2	121	891	105	6,0	5,1
3	71	56	113	3,2	1,7
Total (mm)	472	1614	611	1922	1312
Usina São Martinho					
1	275	594	368	3,3	2,0
2	121	1144	37	5,5	5,2
3	132	15	311	3,0	0,7
Total (mm)	528	1752	716	1979	1263

^{*1}Estádio 1: Estabelecimento e crescimento inicial (do plantio a novembro/05);

^{*1}Estádio 2: Máximo crescimento vegetativo (dezembro/05 a março/06);

^{*1}Estádio 3: Início da maturação e maturação (abril/06 até a colheita);

^{*2}ETPc: Evapotranspiração potencial da cultura; ETRc: Evapotranspiração real da cultura; Déficit hídrico

Cana-soca

No ciclo da cana-soca a distribuição das precipitações foi semelhante nas três áreas, diferindo somente na USM que apresentou um excedente hídrico em janeiro de 2006 em comparação com as outras áreas (Figura 3). A evapotranspiração potencial e real também seguiram padrões similares nas três áreas, sendo estas bastante próximas entre si de outubro de 2006 e março de 2007, período de precipitações abundantes. Quando a evapotranspiração real é próxima da potencial as condições climáticas para o crescimento são otimizadas e favorecem o acúmulo de fitomassa, motivo pelo qual pode-se chamar esse período de estágio de máximo crescimento da cana-de-açúcar.

Figura 3 - Balanço hídrico climatológico nas três áreas experimentais (USA, USL e USM) no ciclo agrícola da cana-soca. ETPc: Evapotranspiração potencial da cultura; ETRc: Evapotranspiração real da cultura; P: precipitação pluviométrica

As precipitações totalizaram 1.430, 1.510 e 1.700 mm de chuva na USA, USL e USM, respectivamente, sendo as maiores pluviosidades concentradas no estágio de máximo crescimento nas três áreas (Tabela 5).

A evapotranspiração real foi ligeiramente superior na USL (1036 mm) e USA (1026 mm) em relação à USM (1008 mm). No estágio de máximo crescimento (estádio 2), a evapotranspiração real atingiu os maiores valores, variando de 4,5 a 5,2 mm dia⁻¹, ao passo que nos estádios inicial (1) e final (3) variaram de 1,2 e 1,9 mm dia⁻¹. No ciclo da cana-soca, a evapotranspiração real da cultura máxima foi, respectivamente, de 6,5; 6,4 e 5,6 mm dia⁻¹ na USA, USL e USM.

No ciclo da cana-soca o déficit hídrico foi bem inferior ao do ciclo da cana-planta. O déficit hídrico total foi de 342, 356 e 471 mm, respectivamente, na USL, USM e USA, concentrando-se nos estádios de crescimento inicial e de maturação, sendo pequeno no estágio de máximo crescimento.

Tabela 5 - Balanço hídrico climatológico nas três áreas experimentais (USA, USL e USM) no ciclo agrícola da cana-soca, em três estádios de desenvolvimento da cultura

Estádios^{*1}	Nº de dias	Pluviosidade mm	Déficit^{*2}	ETPc^{*2} mm dia⁻¹	ETRc^{*2}
Usina Santa Adélia					
1	143	340	222	3,5	1,9
2	121	950	57	5,7	5,2
3	101	135	192	3,1	1,2
Total (mm)	365	1426	471	1497	1026
Usina São Luiz					
1	173	383	152	2,6	1,8
2	121	977	63	5,5	5,0
3	81	152	126	3,1	1,6
Total (mm)	375	1511	342	1377	1036
Usina São Martinho					
1	112	318	131	3,5	2,3
2	121	1170	38	4,8	4,5
3	142	205	187	2,8	1,5
Total (mm)	375	1693	356	1364	1008

^{*1}Estádio 1: Estabelecimento e crescimento inicial (1ª colheita a novembro/06);

^{*1}Estádio 2: Máximo crescimento vegetativo (dezembro/06 a março/07);

^{*1}Estádio 3: Início da maturação e maturação (abril/07 a 2ª colheita);

^{*2}ETPc: Evapotranspiração potencial da cultura; ETRc: Evapotranspiração real da cultura; Déficit hídrico

No estágio de máximo crescimento foi observada maior pluviosidade na USM em relação às outras áreas, o que pode ter favorecido uma diminuição na radiação solar nesse estágio, diminuindo também a evapotranspiração real da cultura. A elevada pluviosidade nesse período na USM, associado à menor evapotranspiração, resultou no menor déficit hídrico na USM o que, no entanto, poderá não resultar em ganhos de produtividade comparado às outras áreas, devido à menor evapotranspiração real da cultura (540, 605 e 629 mm, respectivamente, na USM, USL e USA, no estágio de máximo crescimento) (Tabela 5).

4.3.2 Desenvolvimento radicular e produtividade

4.3.2.1 Cana-planta (1º corte)

Usina Santa Adélia

Na Usina Santa Adélia a adubação nitrogenada de plantio não favoreceu o acúmulo de raízes e rizomas na colheita da colheita (Tabela 6) e a massa de rizomas foi superior à de raízes. A produtividade de colmos não foi influenciada pela adubação nitrogenada de plantio, enquanto que a pol na cana e a produtividade de açúcar foram significativamente superiores à testemunha nos tratamentos fertilizados, se ajustando à função quadrática (Tabela 7).

Tabela 6 - Massa de matéria seca de raiz, rizoma e total do sistema radicular em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina Santa Adélia. Média de 4 repetições. Jaboticabal/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Raízes	Rizomas t ha ⁻¹	Total
0	2,5	6,4	8,9
40	2,9	4,5	7,4
80	2,0	4,5	6,5
120	2,2	5,5	7,7
CV (%)	35,9	62,7	50,6
Teste F	0,74 ^{NS}	0,27 ^{NS}	0,23 ^{NS}
R ² - RL	NS	NS	NS
R ² - RQ	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

^{NS} = não significativo

Tabela 7 - Produtividade de colmos, pol na cana e produtividade de açúcar em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina Santa Adélia. Jaboticabal/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Colmos t ha ⁻¹	PC^a %	AÇÚCAR^b t ha ⁻¹
0	145	15,6	22,6
40	144	16,9	24,4
80	147	16,8	24,7
120	146	15,8	23,0
CV (%)	3,46	5,66	6,76
Teste F	1,25 ^{NS}	4,16 ^{***}	4,09 ^{***}
R ² - RL	NS	NS	NS
R ² - RQ	NS	0,99 ^{****}	0,99 ^{****}

^a PC = "pol" ou sacarose na cana; ^b Açúcar = (Colmos x PC)/100

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

****, *** e ^{NS} = significativo a 1 e 5 % e não significativo, respectivamente

Usina São Luiz

Na Usina São Luiz a adubação nitrogenada de plantio favoreceu o desenvolvimento do sistema radicular, com aumento da massa de raízes e rizomas (Tabela 8).

Assim como ocorreu efeito no desenvolvimento do sistema radicular, a adubação nitrogenada de plantio promoveu efeito na produtividade de colmos (Tabela 9). As doses de nitrogênio resultaram em efeito quadrático na produtividade de colmos, entretanto não promoveram efeitos no teor de pol da cana e na produtividade de açúcar.

Tabela 8 - Massa de matéria seca de raiz, rizoma e total do sistema radicular em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina São Luiz. Média de 4 repetições. Pirassununga/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Raízes	Rizomas t ha ⁻¹	Total
0	1,9	4,1	6,0
40	2,5	2,8	5,6
80	2,3	6,3	8,6
120	3,7	4,0	7,1
CV (%)	32,5	47,2	30,2
Teste F	2,25*	2,52*	2,01*
R ² - RL	0,51**	NS	0,36*
R ² - RQ	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

**, * e ^{NS} = significativo a 10, 20% e não significativo, respectivamente

Tabela 9 - Produtividade de colmos, pol na cana e produtividade de açúcar em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina São Luiz. Pirassununga/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Colmos t ha ⁻¹	PC^a %	AÇÚCAR^b t ha ⁻¹
0	134	14,5	19,5
40	142	14,7	20,9
80	139	14,7	20,4
120	141	13,8	19,5
CV (%)	2,66	6,08	6,58
Teste F	1,94**	0,87 ^{NS}	0,85 ^{NS}
R ² - RL	0,47***	NS	NS
R ² - RQ	0,63*	NS	NS

^a PC = "pol" ou sacarose na cana; ^b Açúcar = (Colmos x PC)/100

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

***, **, * e ^{NS} = significativo a 5, 10 e 20% e não significativo, respectivamente

Usina São Martinho

Na Usina São Martinho não ocorreu efeito das doses de N na massa de raízes e rizomas (Tabela 10). Entretanto, observa-se que a massa da massa de raízes foi 0,9, 0,2 e 0,7 t ha⁻¹ superior para as doses de 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ N, respectivamente, em relação à testemunha. Dessa maneira, há indícios de que a adubação nitrogenada de plantio pode ter favorecido o crescimento de raízes nesse solo e que a falta de significância estatística provavelmente está associada à elevada variabilidade encontrada nos resultados (CV acima de 60%). O mesmo parece ter ocorrido para a massa total de raízes e rizomas em função das doses de N.

Tabela 10 - Massa de matéria seca de raiz, rizoma e total do sistema radicular em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina São Martinho. Média de 4 repetições. Pradópolis/SP

Dose de N kg ha⁻¹	Raízes	Rizomas t ha⁻¹	Total
0	0,9	5,5	6,4
40	1,8	7,2	9,0
80	1,1	7,6	8,7
120	1,6	4,9	6,5
CV (%)	60,5	43,0	40,2
Teste <i>F</i>	0,82 ^{NS}	0,81 ^{NS}	0,72 ^{NS}
R ² - RL	NS	NS	NS
R ² - RQ	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

^{NS} = não significativo

A menor massa de raízes na USM comparada à USA e USL não prejudicou o desenvolvimento da parte aérea, tendo em vista a elevada produtividade obtida (Tabela 11). A produtividade de colmos e açúcar foi superior nos tratamentos fertilizados, com ajuste linear entre as doses aplicadas e a produtividade. Há indícios da existência de relação entre a massa de raízes e a produtividade de colmos e açúcar na área da USM. Não houve efeito das doses de N no teor de pol da cana (Tabela 11).

O déficit hídrico acumulado entre abril de 2006 até a colheita na USM foi de 311 mm, superior às outras duas áreas, tendo em vista que o corte da USM foi o mais tardio, favorecendo o secamento do solo. Esse déficit hídrico acentuado pode ter promovido a morte de raízes, contribuindo para a pequena massa encontrada na colheita.

Tabela 11 - Produtividade de colmos, pol na cana e produtividade de açúcar em função da fertilização nitrogenada de plantio na Usina São Martinho. Pradópolis/SP

Dose de N kg ha ⁻¹	Colmos t ha ⁻¹	PC^a %	AÇÚCAR^b t ha ⁻¹
0	141	16,7	23,5
40	153	17,5	26,8
80	156	16,7	25,9
120	159	17,2	27,4
CV (%)	6,32	4,09	7,94
Teste F	4,11***	2,06 ^{NS}	4,85***
R ² - RL	0,89****	NS	0,67***
R ² - RQ	NS	NS	NS

^a PC = “pol” ou sacarose na cana; ^b Açúcar = (Colmos x PC)/100

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

****, *** e ^{NS} = significativo a 1, 5% e não significativo, respectivamente

4.3.2.2 Cana-soca (2º corte)

Usina Santa Adélia

A produtividade de colmos e açúcar foi influenciada pelas doses de N aplicadas após o 1º corte nos tratamentos que receberam 40 e 120 kg ha⁻¹ de N (Tabela 12). Embora os tratamentos testemunha e 80 kg ha⁻¹ N-plantio não apresentaram significância estatística para as doses de N-soqueira, pode-se dizer que a resposta em produtividade de colmos e açúcar às doses de N-soqueira foi consistente, tendo em vista que na média das doses de N-plantio houve resposta linear na produtividade de colmos e açúcar em função das doses de N-soqueira.

Não houve efeito das doses de N aplicadas após o 1º corte na massa de raízes e rizomas na colheita do 2º corte (Tabela 13). Também não houve diferença na massa de raízes e rizomas no 2º corte entre a testemunha (sem N mineral) e a dose de 120 kg ha⁻¹ de N-plantio.

Tabela 12 - Produtividade de colmos e ATR no 2º corte em função da fertilização nitrogenada de plantio e a realizada após o 1º corte, na Usina Santa Adélia. Jaboticabal/SP

N soca	N plantio (kg ha⁻¹)				Média
	0	40	80	120	
kg ha ⁻¹			Colmos (t ha ⁻¹)		
0	116	109	120	111	114
50	119	120	123	121	121
100	114	125	122	123	121
150	123	119	123	124	122
Teste <i>F</i>	0,63 ^{NS}	3,34**	0,19 ^{NS}	1,63 ^{NS}	3,15***
R ² - RL	NS	0,44**	NS	0,76***	0,72***
R ² - RQ	NS	0,99***	NS	NS	NS
			Açúcar (t ha ⁻¹)		
0	16,9	15,9	18,2	16,4	16,8
50	17,6	17,6	18,4	17,3	17,7
100	16,7	19,1	18,4	18,5	18,2
150	17,9	17,7	18,9	18,6	18,3
Teste <i>F</i>	0,67 ^{NS}	5,15***	0,4 ^{NS}	1,82 ^{NS}	3,84***
R ² - RL	NS	0,46***	NS	0,92***	0,88***
R ² - RQ	NS	0,94***	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

***, **, * e ^{NS} = significativo a 1, 5, 10% e não significativo, respectivamente

Tabela 13 - Massa de matéria seca de raízes, rizomas e total do sistema radicular (t ha⁻¹) em função das doses de N aplicadas na soqueira, para duas doses de N aplicadas no plantio. Usina Santa Adélia. Jaboticabal/SP

N Soqueira	N plantio (kg ha⁻¹)					
	0	40		120		
kg ha ⁻¹	Raízes	Rizomas	Total	Raízes	Rizomas	Total
0	1,7	5,2	6,9	2,1	4,5	6,6
50	2,0	4,6	6,6	2,8	4,6	7,4
100	2,3	4,6	6,9	2,2	4,3	6,5
150	2,1	4,3	6,4	2,2	4,4	6,6
Média	2,0	4,7	6,7	2,3	4,4	6,8
CV	32,5	22,7	17,1	38,2	16,8	17,8
Teste <i>F</i>	0,35 ^{NS}	0,37 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,31 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,34 ^{NS}
R ² - RL	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R ² - RQ	NS	NS	NS	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática;

^{NS} = não significativo

Usina São Luiz

As doses de N-soqueira promoveram efeito quadrático na produtividade de colmos e açúcar no tratamento sem N-plantio e efeito linear nas doses 80 e 120 kg ha⁻¹ N-plantio (Tabela 14). Na média das doses de N-plantio houve efeito linear e altamente significativo na produtividade de colmos e açúcar em função das doses de N-soqueira. A falta de significância das doses de N-soqueira na dose de N-plantio de 40 kg ha⁻¹ deveu-se à maior variabilidade na produtividade de colmos (desvio padrão: 8,8 t ha⁻¹ e CV: 10,2%).

Somente foi evidenciado efeito de doses de N-soqueira na massa de raízes no tratamento sem N mineral no plantio (testemunha), com efeito quadrático significativo (Tabela 15). Entretanto, a massa de raízes diminuiu com as doses de 50 e 100 e aumentou na dose de 150 kg ha⁻¹ N, não havendo explicação para esse efeito.

Tabela 14 - Produtividade de colmos e ATR no 2º corte em função da fertilização nitrogenada de plantio e a realizada após o 1º corte, na Usina São Luiz. Pirassununga/SP

N soca	N plantio (kg ha ⁻¹)				Média
	0	40	80	120	
kg ha ⁻¹					
			Colmos (t ha ⁻¹)		
0	76	81	83	76	79
50	81	88	77	79	81
100	85	84	89	86	86
150	79	90	89	88	86
Teste F	2,59*	0,68 ^{NS}	3,72**	2,66*	4,22***
R ² - RL	NS	NS	0,48***	0,97***	0,93****
R ² - RQ	0,89***	NS	NS	NS	NS
			Açúcar (t ha ⁻¹)		
0	10,5	10,9	11,1	10,3	10,7
50	11,0	12,2	10,1	10,4	10,9
100	11,8	11,5	12,0	11,6	11,7
150	11,1	12,1	12,3	12,1	11,9
Teste F	4,04***	NS	5,66***	1,76 ^{NS}	4,35****
R ² - RL	0,42***	NS	0,52***	0,92**	0,93****
R ² - RQ	0,82**	NS	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática;

****, ***, **, * e ^{NS} = significativo a 1, 5, 10, 20% e não significativo, respectivamente

Tabela 15 - Massa de matéria seca de raízes, rizomas e total do sistema radicular (t ha^{-1}) em função das doses de N aplicadas na soqueira, para duas doses de N aplicadas no plantio. Usina São Luiz. Pirassununga/SP

N soqueira kg ha^{-1}	N plantio (kg ha^{-1})					
	Raiz	0 Rizoma	Total	Raiz	120 Rizoma	Total
0	3,4	2,9	6,3	2,1	3,7	5,8
50	2,2	2,5	4,7	2,2	2,8	5,0
100	2,3	3,6	5,9	2,4	4,8	7,2
150	4,1	2,7	6,8	2,1	2,8	4,9
Média	3,0	2,9	5,9	2,2	3,5	5,7
CV	36,8	35,4	28,0	30,7	39,5	27,3
Teste F	4,36***	1,13 ^{NS}	1,52 ^{NS}	0,19 ^{NS}	2,99**	2,17 ^{NS}
R ² - RL	NS	NS	NS	NS	NS	NS
R ² - RQ	0,99****	NS	NS	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

****, ***, **, * e ^{NS} = significativo a 1, 5, 10, 20% e não significativo, respectivamente

Há indício de ter ocorrido efeito inverso das doses de N-soqueira na produtividade de colmos e na massa de raízes. Nos tratamentos com doses de N-soqueira de 50 e 100 kg ha^{-1} e sem N-plantio, a produtividade de colmos foi superior e a massa de raízes inferior. Ou seja, a produtividade de colmos foi superior nos tratamentos com menor massa de raízes. Fato semelhante foi observado por Vasconcelos (2002) que obteve relação inversa entre a massa de raízes e a altura e diâmetro dos colmos de cana-de-açúcar. Entretanto, neste estudo esse efeito somente ocorreu nos tratamentos que não receberam fertilizante mineral no plantio (testemunha).

Na média das doses de N-soqueira foram encontradas 3 t ha^{-1} de raízes na testemunha (sem N-plantio) e 2,2 t ha^{-1} na dose de 120 kg ha^{-1} N-plantio (Tabela 15). Ou seja, o efeito favorável das doses de N-plantio na massa de raízes obtida na colheita da cana-planta (1,9 e 3,1 t ha^{-1} de raízes na testemunha e 120 kg ha^{-1} N, respectivamente) não se estendeu até a colheita do 2º corte, porém sem causar efeitos negativos na produtividade de colmos no 2º corte. Esse fato demonstra que a massa de raízes não caracteriza de forma completa a capacidade do sistema radicular para absorver água e nutrientes e, também, que não existe uma relação direta entre a massa de raízes e a produtividade de colmos.

Usina São Martinho

Analisando a resposta da cana-soca às doses de N-soqueira para cada uma das doses de N-plantio, não foi verificado efeito tanto na produtividade de colmos como de açúcar (Tabela 16). Já na média das doses de N-plantio, as doses de N-soqueira resultaram em efeito linear significativo na produtividade de colmos e de açúcar. O efeito se tornou significativo uma vez que neste tipo de análise considerou-se um número maior de repetições (maior grau de liberdade).

Tabela 16 - Produtividade de colmos e ATR no 2º corte em função da fertilização nitrogenada de plantio e a realizada após o 1º corte, na Usina São Martinho. Pradópolis/SP

N soca	N plantio (kg ha⁻¹)				Média
0	40	80	120		
kg ha ⁻¹	Colmos (t ha ⁻¹)				
0	76	76	73	78	76
50	79	71	78	81	78
100	87	77	82	85	83
150	84	82	79	82	82
Teste F	1,59 ^{NS}	1,89 ^{NS}	0,24 ^{NS}	0,71 ^{NS}	2,11*
R ² - RL	NS	NS	NS	NS	0,80***
R ² - RQ	NS	NS	NS	NS	NS
	Açúcar (t ha ⁻¹)				
0	12,5	12,4	11,8	12,7	12,3
50	12,9	11,4	12,2	13,1	12,4
100	13,5	12,3	13,2	13,7	13,2
150	13,6	13,2	12,4	13,4	13,1
Teste F	0,62 ^{NS}	1,40 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,61 ^{NS}	1,6*
R ² - RL	NS	NS	NS	NS	0,81**
R ² - RQ	NS	NS	NS	NS	NS

RL = regressão linear; RQ = regressão quadrática

***, **, * e ^{NS} = significativo a 5, 10, 20% e não significativo, respectivamente

A falta de significância para as doses de N-soqueira pode ter como explicação o acentuado déficit hídrico que ocorreu na USM ao final do ciclo da cana-planta (311 mm – Tabela 4) e início do ciclo da cana-soca (131 mm – Tabela 5), totalizando 442 mm, que pode ter limitado o potencial produtivo da cana-de-açúcar na área. Esse déficit hídrico acentuado, associado à pequena massa de raízes encontrada na colheita do 1º corte na USM (inferior a da USA e USL), provavelmente foi a causa da diminuição brusca da produtividade da USM do primeiro (média de 152 t ha⁻¹) para o segundo corte (média de 80 t ha⁻¹).

Na USM não foi realizada amostragem de raízes nos tratamentos 50 e 100 kg ha⁻¹ N-soqueira. Diferentemente das outras áreas, na USM as doses de N aplicadas após o 1º corte favoreceram o desenvolvimento de raízes (Tabela 17). Na dose de 120 kg ha⁻¹ N-plantio, a massa de rizomas e raízes mais rizomas no tratamento que recebeu 150 kg ha⁻¹ N-soqueira foi estatisticamente superior ao tratamento sem N-soqueira. A massa de raízes nos tratamentos que receberam 150 kg ha⁻¹ N-soqueira foram 1,6 e 2,5 vezes superior à testemunha (sem N-soqueira) para os tratamentos que não receberam N-mineral no plantio e para a dose de 120 kg ha⁻¹ N-plantio, respectivamente, porém sem diferirem estatisticamente.

Tabela 17 - Massa de matéria seca de raízes, rizomas e total (t ha⁻¹) em função da fertilização nitrogenada de soqueira, com e sem fertilização nitrogenada de plantio. Usina São Martinho. Pradópolis/SP

N soqueira kg ha ⁻¹	N plantio (kg ha ⁻¹)					
	0	0	120	0	120	0
	Raiz	Rizoma	Total	Raiz	Rizoma	Total
0	0,8 a	3,0 a	3,8 a	0,4 a	2,8 b	3,2 b
150	1,3 a	3,0 a	4,3 a	1,0 a	3,3 a	4,3 a
Média	1,0	3,0	4,1	0,7	3,0	3,7
CV (%)	65,0	32,6	39,7	80,9	32,3	30,8
Teste F	1,40 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,24 ^{NS}	4,94*	4,76*	9,28**
DMS	1,04	1,54	2,56	0,71	0,47	0,88

Médias seguidas de letras minúsculas iguais nas colunas não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 10% de probabilidade. DMS: diferença mínima significativa.

**, * e ^{NS} = significativo a 10, 20% e não significativo, respectivamente

A massa de raízes na USM no 2º corte, assim como no 1º corte, foi inferior às áreas da USA e USL, indicando que a massa de raízes da cultivar SP81 3250 é inferior em solos mais férteis e de textura mais argilosa do que em solos menos férteis e de textura mais arenosa.

4.4 Discussão

4.4.1 Produtividade da cana-planta em função da adubação nitrogenada

Na USA foram incorporados ao solo 29 t ha⁻¹ de resíduos culturais antes da instalação deste experimento, composto de palha e parte aérea e sistema radicular da rebrota, contendo 200, 20 e 150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente (FRANCO et al., 2007b). A ausência de resposta na produtividade de colmos à adubação nitrogenada nesse local deveu-se, principalmente, a essa quantidade de N-resíduo incorporada ao solo, que foi suficiente para proporcionar um sistema radicular vigoroso e capaz de suprir a planta com água e nutrientes, independentemente da adição de N-mineral. Também deve ser considerado o fato do preparo intensivo do solo antes da implantação do experimento, inclusive com aração e gradeação, contribuindo para a mineralização da matéria orgânica e liberação de N nativo do solo, que pode ter suprido toda a necessidade da cana-planta, conforme Salcedo, Sampaio e Alves (1985) e Araújo, Sampaio e Salcedo (2001). Uma última hipótese para a falta de resposta na área da USA refere-se ao déficit hídrico acentuado no final do ciclo da cana-planta, que pode ter limitado o crescimento da cultura a utilização do N-fertilizante. Entretanto, apesar da falta de resposta em produtividade de colmos, foi encontrado aumento no teor de pol da cana e produtividade de açúcar. Esse fato pode estar relacionado a uma melhor nutrição nitrogenada e maior absorção de nutrientes nos estádios iniciais de brotação e estabelecimento da cultura, nos tratamentos que receberam N-mineral, que influíram na produtividade final de sacarose.

Na USL obteve-se resposta para produtividade de colmos da cana-planta, sem efeito significativo para a pol da cana. A resposta em produtividade de sacarose deveu-se exclusivamente a maior produtividade de colmos. Nesse local, embora não foi

realizada estimativa de resíduos culturais incorporados ao solo na reforma do canavial, a quantidade deve ter sido inferior à da USA e próxima da USM, considerada a produtividade da cana-de-açúcar no último ciclo agrícola antes da reforma (75 t ha^{-1} na USL e USM, comparado a 128 t ha^{-1} na USA). Esse fato, aliado ao menor déficit hídrico no estágio final de desenvolvimento da cultura, tornam-se as principais hipóteses para a resposta em produtividade obtida mediante aplicação de fertilizante nitrogenado.

Na USM a quantidade de resíduos incorporados ao solo na reforma foi de $16,7 \text{ t ha}^{-1}$, contendo 83, 65 e 9 kg ha^{-1} , respectivamente de N, P_2O_5 e K_2O (FRANCO et al., 2007b), inferiores às quantidades incorporadas na USA. Na USM a resposta linear em produtividade de colmos e açúcar às doses de N provavelmente esteve relacionada à menor quantidade de N incorporada via resíduos; à menor mineralização da matéria orgânica e do N nativo do solo, tendo em vista que o preparo do solo foi reduzido; ausência de déficit hídrico no estágio de máximo desenvolvimento e à maior fertilidade do solo comparado à USA e USL, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Orlando Filho (1993) enfatizou três condições em que a cana-planta pode apresentar resposta à adubação nitrogenada, que são solos de alta fertilidade, solos onde se cultiva a cana pela primeira vez e solos sob cultivo mínimo. Duas dessas condições ocorrem na área da USM, que apresentou elevada resposta ao N, corroborando com as hipóteses levantadas por esse autor.

As principais hipóteses para a maior produtividade de colmos obtida na cana-planta na USM em relação às outras áreas referem-se à melhor fertilidade do solo, menor déficit hídrico no estágio de máximo crescimento e menor massa de raízes, diminuindo o gasto energético para a produção desses órgãos, favorecendo o crescimento e produtividade da parte aérea. Humbert (1974 apud CASAGRANDE, 1991) afirmou que, em solos férteis, uma quantidade relativamente menor de raízes é requerida para a produção da parte aérea. Vasconcelos (2002) obteve relação inversa entre a massa de raízes e a altura e diâmetro dos colmos de cana-de-açúcar, provavelmente devido à competição por fotoassimilados no desenvolvimento de raízes e da parte aérea. Entretanto, a menor massa de raízes encontrada na USM, em solo argiloso eutrófico, pode ser desfavorável em situações em que ocorra acentuado déficit hídrico, como será comentado mais a frente.

4.4.2 Sistema radicular na cana-planta em função da adubação nitrogenada

A massa de raízes na colheita da cana-planta foi influenciada pelas doses de N de plantio na USL e na USM (sem significância estatística neste último caso), enquanto que a massa de rizomas não foi influenciada pela adubação nitrogenada. Resultados semelhantes foram obtidos por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987), que encontraram maior massa de raízes na colheita da cana-planta com a dose de 60 kg ha⁻¹ N em relação à testemunha, porém sem efeitos na massa de colmos e rebolos subterrâneos. Em trabalhos desenvolvidos em vasos contendo solo arenoso, Trivelin et al (2002) em condição de cana-planta de ano e Bologna-Campbell (2006) em cana-planta de ano e meio constataram aumento linear na massa subterrânea (raízes e rizomas) em função de doses de nitrogênio.

Na média das doses de nitrogênio, a massa de raízes foi de 2,4, 2,5 e 1,35 t ha⁻¹ na USA, USL e USM, respectivamente, indicando ter ocorrido diferenças entre a massa de raízes entre as áreas. Em relação à massa total de raízes e rizomas, não ocorreu diferença entre as áreas (7,6, 6,8 e 7,7 t ha⁻¹ na USA, USL e USM, respectivamente). Humbert (1974 apud CASAGRANDE, 1991) afirmou que o sistema radicular da cana-de-açúcar se adapta às características do meio ambiente e que o volume de raízes, seu peso e comprimento não caracterizam de forma completa a capacidade do sistema radicular para absorver água e nutrientes. Em solos férteis, uma quantidade relativamente menor de raízes é requerida para a produção da parte aérea. Essas afirmações dão suporte aos resultados obtidos neste estudo, tendo em vista que o solo da USM é mais fértil que o da USA e da USL, o que pode explicar a menor massa de raízes encontrada na USM.

Smith (1998 apud SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005), observou que, quando 50% das raízes de cana-de-açúcar foram removidas, fisicamente (por exclusão) ou funcionalmente (por irrigação induzida), o uso de água e taxa de alongamento da planta diminuíram somente 10%. Assim, a redução do tamanho do sistema radicular não causou mudança proporcional no crescimento da parte aérea e no uso de água. O autor concluiu que existe, portanto, “capacidade adicional” no sistema radicular da cana-de-açúcar e, sob condições adequadas de solo, a cana-de-açúcar tem mais raízes

do que é necessário para o crescimento máximo. Esse efeito pode ter ocorrido nas áreas da USA e USL, onde a cana-de-açúcar produziu uma quantidade de raízes relativamente maiores do que a necessária para o crescimento da parte aérea.

Na colheita da cana-planta, a massa de rizomas foi maior na USM (6,3 t ha⁻¹), seguido pela USA (5,2 t ha⁻¹) e USL (4,3 t ha⁻¹), porém sem influência da adubação nitrogenada de plantio, fato também observado por Sampaio, Salcedo e Cavalcanti (1987).

4.4.3 O papel do sistema radicular na manutenção de elevadas produtividades

O sistema radicular da cana-de-açúcar tem papel fundamental na manutenção da produtividade entre os cortes, favorecendo também a longevidade das soqueiras, por ser um órgão de reserva nutricional e fonte de água e nutrientes para a rebrota subsequente.

A USA foi a que apresentou a menor queda de produtividade do 1º para o 2º corte, passando de 145 para 119 t ha⁻¹ (queda de 21%). Na USL e USM a queda de produtividade entre os corte foi expressiva e anormal, passando, respectivamente, de 139 para 83 t ha⁻¹ (queda de 67%) e de 152 para 80 t ha⁻¹ (queda de 90%). No caso da USL a queda de produtividade foi devido ao ataque da praga *Sphenophorus levis* no ciclo da cana-soca, tendo em vista que na amostragem dos rizomas foi detectado ataque da larva em mais de 70% das touceiras avaliadas. No caso da USM a queda na produtividade esteve relacionada, provavelmente, ao déficit hídrico e reduzida massa de raízes.

No experimento USM ocorreu acentuado déficit hídrico na área da USM no final do ciclo da cana-planta (311 mm – Tabela 4) e início do ciclo da cana-soca (131 mm – Tabela 5), totalizando 442 mm. Esse déficit hídrico associado à pequena massa de raízes (inferior à USL e USA) encontrada na colheita do 1º corte na USM, pode ter prejudicado a brotação e estabelecimento do estande de plantas para o próximo ciclo, sendo provavelmente a causa da diminuição brusca da produtividade da USM do 1º para o 2º corte. Na USA o déficit hídrico acumulado nos dois períodos foi de 448 mm, porém a massa de raízes na colheita foi praticamente o dobro da encontrada na USM,

favorecendo a absorção de água e o estabelecimento do estande de plantas para o próximo ciclo.

4.4.4 Produtividade da soqueira em função da fertilização nitrogenada

A resposta em produtividade da cana-soca às doses de N aplicadas após a colheita da cana-planta foi menor do que normalmente se encontra na literatura. Vitti et al. (2007) obteve resposta linear das doses de N na produtividade de segunda soca (3º corte) em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO, com diferenças de até 100% na produtividade de colmos entre a maior dose de N (175 kg ha^{-1} de N) e a testemunha. As doses de N foram tão favoráveis ao aumento de produtividade que as diferenças se mantiveram para a terceira soca, mesmo sendo aplicada dose única de N após a colheita da 2ª soca. Isso provavelmente ocorreu devido às baixas reservas de N naquele solo e ao esgotamento do N mineralizado na reforma do canavial, tendo em vista que o estudo foi conduzido em 2ª e 3ª soca.

Em relação às baixas repostas neste estudo, os principais motivos devem estar relacionados ao fato de ser uma 1ª soca, que ainda pode ter a disposição quantidade satisfatória de N mineralizado após a reforma dos canaviais; ao estoque de resíduos que foi incorporado ao solo na reforma do canavial na área da USA e que provavelmente forneceu N à cultura até mesmo no ciclo da 1ª soca; ao regime pluviométrico, tendo em vista que os déficits hídricos podem ter limitado a expressão do potencial produtivo dos canaviais e também à infestação das plantas com praga de solo ocorrido na USL.

Wiedenfeld (2000) não constatou aumento de produtividade em função de doses de N na cana-planta e no 1º corte, porém do 2º ao 4º corte as doses de N promoveram efeito quadrático na produtividade de colmos e açúcar. Segundo esse autor, as doses de N para máxima produtividade de colmos foi de 141, 162 e 176 kg ha^{-1} N para o 2º, 3º e 4º corte, respectivamente, bastante superiores às obtidas neste estudo.

4.4.5 Sistema radicular da cana-soca em função da adubação nitrogenada de plantio e a realizada após o 1º corte

Na colheita da cana-soca, a massa de raízes somente foi influenciada pelas doses de N-soqueira na USM, em solo de textura mais argilosa. Na testemunha (sem N-soqueira) foi encontrado $0,6 \text{ t ha}^{-1}$ de raízes enquanto que na dose de 150 kg ha^{-1} de N foi encontrado $1,15 \text{ t ha}^{-1}$ até $0,6 \text{ m}$ de profundidade no solo, praticamente o dobro de raízes. Isso demonstra a importância da fertilização nitrogenada em solos de textura argilosa e de elevada fertilidade, favorecendo o desenvolvimento de raízes, o que se torna importante em ocasião de ocorrência de déficit hídrico acentuado nesses solos.

Na USA e USL a adubação nitrogenada de soqueira não exerceu efeito pronunciado na massa de raízes, assim como a fertilização nitrogenada de plantio não exerceu influência marcante na massa de raízes no 2º corte do canavial.

Na USA e USL a massa de raízes na cana-planta foi praticamente igual à da cana-soca, sendo na média de todas as doses de N, respectivamente de $2,4$ e $2,5 \text{ t ha}^{-1}$ na cana-planta e $2,2$ e $2,6 \text{ t ha}^{-1}$ na cana-soca. Entretanto, a massa de rizomas diminuiu, passando de $5,2$ e $4,3 \text{ t ha}^{-1}$ na cana-planta para $4,6$ e $3,2 \text{ t ha}^{-1}$ na cana-soca, respectivamente na USA e USL, ou seja, diminuição de 12 e 25% na massa. Isso podendo ter sido devido, provavelmente, à decomposição dos colmos-sementes e de rizomas de um ciclo para outro. Já na USM houve diminuição tanto da massa de raízes ($1,35$ para $0,8 \text{ t ha}^{-1}$) quanto de rizoma ($6,3$ para 3 t ha^{-1}) da colheita da cana-planta à da cana-soca. Portanto, não foi encontrado acúmulo da massa de raízes de um ciclo para outro, como se constatou na literatura, embora neste trabalho as avaliações tenham se restringido aos ciclos da cana-planta e 1ª soqueira.

4.4. Conclusões

A adubação nitrogenada de plantio favoreceu o crescimento de raízes e esse fato relacionou-se à maior produtividade da cana-planta, especialmente em condições de solos eutróficos;

Em solo argiloso de elevada fertilidade a maior produtividade da cana-planta relacionou-se à menor massa de raízes, enquanto em solos de textura média e menor fertilidade ocorreu o inverso;

A maior massa de raízes em solo de textura média e menor fertilidade em comparação com solo argiloso de elevada fertilidade diminuíram os efeitos do déficit hídrico, favorecendo a rebrota da soqueira e resultando em menor queda na produtividade entre os cortes;

O déficit hídrico limitou resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada de plantio e de soqueira;

A massa de raízes se manteve constante em solo de textura média e diminuiu em solo de textura argilosa entre o 1º e 2º corte, sendo que a massa de rizomas reduziu entre os ciclos agrícolas, em todos solos.

Referências

ALLEN, R.G.; PERIERA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARAÚJO, A.M.S.; SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H. Mineralização do C e do N em amostras armazenadas de solo cultivado com cana-de-açúcar, ao longo de dez anos, com e sem fertilização nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 43-50, 2001.

BOLOGNA-CAMPBELL, I.R. **Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2006. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BRITO, A.S. **Balanco de água em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. 2006. 82 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

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.

CARNAÚBA, B.A.A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 8, n. 3/4, p. 24-41, 1990.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157 p.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO Irrigação e Drenagem, 33).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 521-526, 2007a.

FRANCO, H.C.J.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Estoque de nutrientes em resíduos culturais incorporados ao solo na reforma de áreas com cana-de-açúcar. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 32-36, 2007b.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C (Ed.). **Methods of soil analysis: physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 255-289.

INMAN-BAMBER, N.G.; MCGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 83, p. 125-138, 2003.

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 185-202, 2005.

MARINHO, M.L.; BARBOSA, G.V.S. Adubação nitrogenada da cana-planta na região Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, 6., 2006, Maceió. **Anais ...** Piracicaba: STAB, 2006. p. 455-460.

MORELLI, J.; DEMATTÊ, J.L.I.; DALBEN, A.E.; NELLI, E. Parcelamento da adubação nitrogenada em cana-planta: aplicação no solo. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 6, p. 26-30, 1997.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.S.; OLIVEIRA, E.A.A. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 133-146.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ALVES, G.D. Mineralização do carbono e do nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 33-38, 1985.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I: Eficiência de utilização da uréia (^{15}N) em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 8, p. 943-949, 1984.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III: conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 25-431, 1987.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

THORBURN, P.J.; DART, I.K.; BIGGS, I.J.; BAILLIE, C.P.; SMITH, M.A.; KEATING, B.A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 201-209, 2003.

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.

VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita:** crua mecanizada e queimada manual. 2002. 140 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2002.

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C., PENATTI, C.P.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J.F. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

WIEDENFELD, R.P. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 43, p. 101-108, 1995.

_____. Water stress during the different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 43, p. 173-182, 2000.