Pablo Javier Ghiberto
Engenheiro Agrônomo

Lixiviação de nutrientes em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas**

Piracicaba
2009

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Ghiberto, Pablo Javier

Lixiviação de nutrientes em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar / Pablo Javier
Ghiberto. -- Piracicaba, 2009.
158 p. : il.

Tese (Doutorado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Drenagem agrícola 3. Enxofre 4. Isótopos 5. Latossolos
6. Nitrogênio 7. Poluição I. Título

CDD 633.61
J41L

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

Aos meus Pais

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Paulo Leonel Libardi pela orientação, ensinamentos, pela oportunidade para que fosse possível realizar o presente trabalho e pela amizade.

Ao Professor Paulo César Ocheuze Trivelin pelo apoio na realização do trabalho, pela predisposição, ensinamentos e pela amizade.

Agradeço especialmente às seguintes pessoas, que muito me ajudaram em diferentes etapas do trabalho: Prof. Sergio Oliveira Moraes, Prof. Alvaro Pires da Silva, Prof^a. Silvia del Carmen Imhoff, Prof. Peterson Ricardo Fiorio, Prof. Valdemar Antonio Demétrio, Prof^a. Sônia Maria De Stefano Piedade e Prof. Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni. Alexsandro dos Santos Brito, Jaedson Cláudio Anunciato Mota, Alexandre Martins Fernandes, Graziela Meneghel de Moraes, Renato Alessandro Lopes, Viviane Costa Martins, Cynthia Cristina Bonassi, Hugo Henrique Batagello, Rafael Otto, Henrique Coutinho Junqueira Franco, Carlos Eduardo Faroni, André Cesar Vitti, José Aurélio Bonassi, André Garcia Alves, Getúlio Coutinho Figueiredo, Antônio Marcos Evaristo, Sandro Rogeiro de Souza, Edson Carlos de Brito e Ronaldo Gomes dos Santos. Com todos vocês tenho apreendido muitas coisas e isso é muito valioso. Muito Obrigado!

À usina Santa Adélia (Jaboticabal-SP) pelo apoio logístico na realização deste trabalho.

Às autoridades da Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral (FCA/UNL); à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) e ao Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (PEC-PG) por intermédio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que possibilitaram a realização do meu curso de Doutorado.

Ao Departamento de Ciencias del Ambiente (FCA/UNL) e em especial aos integrantes da disciplina de Edafología pelo apoio recebido para a realização do curso de pós-graduação.

Aos professores, colegas de pós-graduação, funcionários e técnicos, com os quais compartilhei tantos bons momentos e que tornaram prazerosa e proveitosa minha estada no Brasil. A todos: Obrigado pela amizade!

Finalmente, agradeço a minha família, que sempre me acompanha em meus empreendimentos dando-me todo o apoio.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 DESENVOLVIMENTO.....	23
2.1 Revisão bibliográfica.....	23
2.2 Material e Métodos.....	32
2.2.1 Descrição da área de estudo.....	32
2.2.2 Delineamento experimental.....	35
2.2.3 Atributos físicos e físicoquímicos do solo.....	38
2.2.3.1 Porosidade total	39
2.2.3.2 Condutividade hidráulica.....	40
2.2.3.2.1 K_s medida pelo método do permeâmetro de carta decrescente	40
2.2.3.2.2 K medida utilizando infiltrômetro de tensão	41
2.2.3.2.3 K medida pelo método do perfil instantâneo.....	41
2.2.3.3 Curva de retenção de água no solo	44
2.2.3.4 Densidade do solo.....	45
2.2.3.5 Granulometria, argila dispersa em água e carbono orgânico.....	45
2.2.3.6 Ponto de efeito salino nulo e Potencial elétrico superficial.....	47
2.2.4 Componentes do balanço hídrico	48
2.2.4.1 Precipitação (P)	48
2.2.4.2 Armazenagem de água no solo (H)	49
2.2.4.3 Drenagem interna (D) e Ascensão capilar (AC).....	49
2.2.4.4 Evapotranspiração da cultura (ET_r)	50
2.2.5 Concentração de íons na solução do solo.....	51
2.2.5.1 Coleta de amostras.....	51
2.2.5.2 Determinação da concentração de íons da solução extraída do solo.....	51
2.2.5.3 Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{15}N	53
2.2.5.4 Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{34}S	55

2.2.6 Lixiviação de macronutrientes	58
2.2.7 Análise estatística.....	59
2.3 Resultados e Discussão	60
2.3.1 Atributos físicos e físicoquímicos do solo	60
2.3.1.1 Granulometria, matéria orgânica e atributos eletroquímicos.	60
2.3.1.2 Densidade do solo, densidade dos sólidos e porosidade total.....	62
2.3.1.3 Curvas de retenção de água no solo	63
2.3.1.4 Condutividade hidráulica do solo	66
2.3.2 Componentes do balanço hídrico.....	71
2.3.2.1 Precipitação pluvial.....	72
2.3.2.2 Armazenagem de água no solo	73
2.3.2.3 Drenagem interna e Ascensão capilar.....	77
2.3.2.4 Evapotranspiração da cultura	88
2.3.3 Concentração de cátions e ânions na solução do solo.....	91
2.3.4 Concentração de nitrogênio e enxofre da solução no solo.....	97
2.3.5 Lixiviação de macronutrientes	104
3 CONCLUSÕES	125
REFERÊNCIAS.....	127
ANEXOS	143

RESUMO

Lixiviação de nutrientes em um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar

O objetivo deste trabalho foi quantificar a perda de nutrientes por lixiviação, a 0,9 m de profundidade, em um Latossolo Vermelho distrófico localizado no município de Jaboticabal-SP (Brasil) e cultivado com cana-de-açúcar. Foram avaliados os íons nitrito, nitrato, amônio, sulfato, fosfato, cálcio, magnésio e potássio. A cultura foi implantada em abril de 2005 e colhida em julho de 2006 e o monitoramento efetuado no ciclo agrícola de cana-soca entre 16/11/2006 e 9/7/2007. Estabeleceram-se três tratamentos em quatro blocos com distintas doses de sulfato de amônio: Tratamento 1 (T₁): sem fertilizante; Tratamento 2 (T₂): 100 kg ha⁻¹ de N e 114 kg ha⁻¹ de S e, Tratamento 3 (T₃): 150 kg ha⁻¹ de N e 172 kg ha⁻¹ de S. Em todas as parcelas aplicaram-se 120 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de KCl. Para conhecer o destino do N e S do fertilizante, foram instaladas quatro microparcelas no T₂ com sulfato de amônio enriquecido com 2,15 átomos % de ¹⁵N e 10,5 átomos % de ³⁴S. As entradas e saídas dos íons a 0,9 m de profundidade foram quantificadas pela densidade de fluxo de água e a concentração dos elementos da solução no solo, utilizando-se tensiômetros e extratores de solução com cápsula porosa. Foi estimada a evapotranspiração real da cultura a partir de medidas de variação de armazenagem, drenagem interna e precipitação pluvial. No período avaliado, a precipitação pluvial foi 121 mm superior à média histórica (1285 mm) destacando-se o mês de janeiro com 402 mm precipitados (média histórica: 251 mm). A drenagem interna foi de 300 mm no T₁, 352 mm no T₂ e 199 mm no T₃. A evapotranspiração real média foi de 905 mm. A concentração dos íons NO₃⁻, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ aumentou em janeiro acompanhando o aumento da drenagem interna. Observou-se acréscimo no total de sólidos dissolvidos na solução extraída do solo associado ao nitrato nos tratamentos fertilizados. A perda total por lixiviação em kg ha⁻¹ foi de: 3,9 de N, 8,4 de S, 0,4 de P, 36,4 de K, 65,5 de Ca e 16,0 de Mg no T₁; 34,3 de N, 4,6 de S, 1,2 de P, 53,6 de K, 135,7 de Ca e 39,8 de Mg no T₂ e, no T₃, de 21,6 de N, 6,2 de S, 0,3 de P, 26,3 de K, 55,0 de Ca e 13,0 de Mg. A porcentagem média de N proveniente do fertilizante na solução no solo (%NSSPF) foi de 34,9% e a de S proveniente do fertilizante (%SSSPF) de 19,2%, resultando em 22,5 kg ha⁻¹ do N-fertilizante e 0,5 kg ha⁻¹ de S-fertilizante lixiviados. Nas condições experimentais registraram-se perdas apreciáveis de N por lixiviação, nativo e do fertilizante, mesmo com elevada demanda de nutrientes pela cana-soca, devido a fatores que favoreceram a lixiviação: precipitação pluvial superior à normal, solo de elevada permeabilidade, única aplicação de fertilizante e conteúdo de água no solo e temperatura favoráveis à nitrificação. Não se observou similar comportamento para enxofre e fósforo e a lixiviação do potássio, cálcio e magnésio foi importante. Os resultados obtidos não permitem afirmar que o lençol freático será prejudicado mas que se deve tomar providências para manter ou melhorar a qualidade do solo.

Palavras-chave: Isótopos ¹⁵N e ³⁴S; Drenagem interna; Saccharum spp; Poluição; Manejo sustentável

ABSTRACT

Nutrients leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane

The objective of this work was to quantify nutrient leaching losses at 0.9 m depth in an Ultisol in the county of Jaboticabal-SP, Brazil, (21°20'20''S, 48°18'35''W) that was cultivated with sugarcane. The following ions were evaluated: nitrite, nitrate, ammonium, sulfate, phosphate, calcium, magnesium, and potassium. The sugarcane was planted in April 2005 and harvested in July 2007. The monitoring was made in the first ratoon cycle from November 16, 2006 to July 9, 2007. The experimental design was organized as four random blocks and three treatments that consisted of: Treatment 1 (T₁): without fertilizer, Treatment 2 (T₂): 100 kg ha⁻¹ of N and 114 kg ha⁻¹ of S and, Treatment 3 (T₃): 150 kg ha⁻¹ of N and 172 kg ha⁻¹ of S. The fertilizer applied was ammonium sulfate. In addition, 120 kg ha⁻¹ of K₂O with the source potassium chloride (KCl) was also applied. In order to determine the fate of the N-fertilizer and S-fertilizer, four microplots were installed in which 2,15 % atoms of ¹⁵N and 10,5 % atoms of ³⁴S enriched ammonium sulfate was applied. Input and output of anions and cations at the depth of 0.9 m were quantified from the flux density of water and the N concentration in the soil solution at this soil depth; tensiometers, soil water retention curve and soil solution extractors were used for this quantification. The sugarcane actual evapotranspiration was estimated from direct measurement of daily rainfall, internal drainage and soil water storage variation. In the assessment period, rainfall was 121 mm greater than the historical average (1285 mm) highlighting the January month in which it was recorded 402 mm (historical average: 251 mm). The internal drainage of water was 300 mm in T₁, 352 mm in T₂ and 199 mm in T₃. The average actual evapotranspiration was 905 mm. The NO₃⁻, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ ion concentrations increased in January following both, rainfall and drainage. It was observed an increased in the total dissolved solids in the soil solution associated with nitrate concentration in the fertilized treatments. Leaching losses in kg ha⁻¹ were of: 3,9 of N, 8,4 of S, 0,4 of P, 36,4 of K, 65,5 of Ca and 16,0 of Mg in T₁; 34,3 of N, 4,6 of S, 1,2 of P, 53,6 of K, 135,7 of Ca and 39,8 of Mg in T₂ and, in T₃, of 21,6 of N, 6,2 of S, 0,3 of P, 26,3 of K, 55,0 of Ca and 13,0 of Mg. The average percentage of N in the soil solution derived from fertilizer (%NSSDF) was 34,9% and that of the S derived from fertilizer (%SSSDF) was 19,2% resulting in 22,5 kg ha⁻¹ of N and 0,5 kg ha⁻¹ of S from fertilizer leached. Under the experimental conditions, the leaching of N, both native and derived from fertilizer, was considerable mainly because the rainfall was higher than expected, the soil permeability was high, there was a single fertilizer application and the temperature and soil water content were favorable to nitrification. It was not observed similar behavior for sulfur and phosphorus; and significant amounts of potassium, calcium and magnesium were leached. From the results it is not possible to say that groundwater will be contaminated, but caution should be taken to maintain or improve soil quality.

Keywords: ¹⁵N and ³⁴S isotope; Internal drainage; Saccharum spp; Pollution; Sustainable management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descrição morfológica do perfil do solo. Descrição realizada em 18/7/2006, na linha da soqueira seguindo o procedimento de Santos et al. (2005).....	34
Figura 2 - Balanço hídrico climatológico ao longo do ano. Fonte: Sentelhas et. al (2009).	34
Figura 3 - Croqui da área experimental.....	37
Figura 4 - Coleta de amostras indeformadas no solo.	39
Figura 5 - Esquema do arranjo experimental para determinação de K_s pelo método de carga decrescente.....	43
Figura 6 - Arranjo experimental no método do Perfil Instantâneo. Área circular de 3 m de diâmetro confinada por uma chapa galvanizada de 1,2 m de altura inserida no solo até cerca de 0,8 m. No centro da área os tensiômetros.	43
Figura 7 - Amostragem de solo para determinação da armazenagem de água pelo método gravimétrico.....	52
Figura 8 - Tensiômetros e extratores de solução instalados no campo.	53
Figura 9 - Preparo de amostras para determinação da abundância de ^{15}N . (a) Acidificação do filtro com sulfato ácido de potássio; (b) e (c) filtro envolvido com a fita de PTFE; (d) fita com o filtro acidificado colocada no recipiente contendo liga de Devarda e MgO ; (d) depois de agitação por 48 horas os filtros eram colocados em desecador por 48 horas para posteriormente ser analisadas no espectrômetro de massa.....	58
Figura 10 - Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{34}S . (a) Tubo de quartzo; (b) sistema de alto vácuo para obtenção do SO_2 que seria logo analisado no espectrômetro de massas e, (c) SO_2 retido na armadilha A_3 antes de ser transferido ao recipiente ST.	58
Figura 11 - Diagrama simplificado do método utilizado para quantificar a o fluxo de água e nitrogênio. Mesmo procedimento foi utilizado para os outros íons.	59
Figura 12 - Curvas de retenção para cada camada de solo em estudo.....	66
Figura 13 - Influência da densidade do solo na condutividade hidráulica do solo saturado em todas as camadas de solo estudadas pelo método do permeâmetro de carga decrescente. No gráfico da esquerda (a) a escala das ordenadas é logarítmica e as linhas verticais indicam o intervalo de densidade do solo obtido no experimento; no da direita (b) a escala das ordenadas é decimal.	68
Figura 14 - Conteúdo volumétrico de água em profundidade nos diferentes tempos de redistribuição pelo método do perfil instantâneo.	70

Figura 15 - Pluviosidade média mensal de Jaboticabal no período 1936-2004 e medida no local nos meses de experimento.....	73
Figura 16 - Armazenagem de água (H) na camada de 0 a 0,95 m de profundidade nos diferentes períodos de amostragem, nos tratamentos T ₁ , T ₂ e T ₃ . A linha horizontal pontilhada representa a armazenagem na capacidade de campo (H _{cc}) até 0,95 m. Indica-se o desvio-padrão correspondente as quatro repetições de cada tratamento. DAC: dias após colheita da cana-planta.....	75
Figura 17 - Evolução do conteúdo volumétrico de água no perfil do solo em: (a) Tratamento 1, (b) Tratamento 2 e (c) Tratamento 3.....	77
Figura 18 - Evolução do conteúdo volumétrico médio de água (θ) de quatro repetições (linha contínua) a 0,9 m de profundidade durante os meses de monitoramento e valores médios mais e menos o desvio-padrão (linha pontilhada) em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2; (c) Tratamento 3.....	79
Figura 19 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , m _{ca}) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	81
Figura 20 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , m _{ca}) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	82
Figura 21 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , m _{ca}) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	83
Figura 22 - Evolução do gradiente de potencial total de água médio de quatro repetições (linha contínua) e, valores médios mais e menos o desvio-padrão (linha pontilhada) a 0,9 m de profundidade durante os meses de monitoramento, em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2; (c) Tratamento 3.....	86
Figura 23 - Precipitação pluvial diária (barras) e fluxo de água durante o período estudado (linha contínua vermelha) em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2 e (c) Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água no sistema.....	90
Figura 24 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	95
Figura 25 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	96
Figura 26 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.....	97

Figura 27 - Concentração de nitrogênio da solução no solo nos meses de monitoramento no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	98
Figura 28 - Concentração de nitrogênio da solução no solo proveniente do solo (NSSPS) e do fertilizante (NSSPF) nos meses de monitoramento no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	100
Figura 29 - Concentração de nitrogênio da solução no solo no Tratamento 3 nos meses de monitoramento: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	101
Figura 30 - Concentração de enxofre da solução no solo nos meses de monitoramento no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	102
Figura 31 - Concentração de enxofre da solução no solo proveniente do solo (SSSPS) e do fertilizante (SSSPF) no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	103
Figura 32 - Concentração de enxofre da solução no solo no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	104
Figura 33 - Proporção do nitrogênio lixiviado nas diferentes espécies iônicas: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2 e, (c) Tratamento 3.	107
Figura 34 - Lixiviação acumulada de ânions e cátions. Cada ponto experimental representa a média das quatro repetições nos diferentes tratamentos.	119
Figura 35 - Representação gráfica do mapa planialtimétrico da área de estudo.	146
Figura 36 - Representação gráfica do mapa de declividade da área de estudo.	147
Figura 37 - Variação temporal do conteúdo de água e limites superior e inferior do IHO nas diferentes camadas em estudo.	152
Figura 38 - A variação temporal do conteúdo médio de água no solo ($\theta_{\mu} \pm 3\theta_{\sigma}$) e limites superior e inferior do IHO.	152
Figura 39 - Tolerância específica (TE) nas diferentes profundidades.	153
Figura 40 - Diferença mínima em relação ao limite especificado (DNS), definida como o mínimo entre os valores de Z_s e Z_i	153
Figura 41 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	156
Figura 42 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV.	157

- Figura 43 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV..... 157
- Figura 44 - Temperatura do solo em diferentes profundidades no ciclo agrícola monitorado. Cada leitura corresponde à média de duas leituras de termômetros localizados em duas parcelas experimentais. 158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos do perfil do solo em estudo (Primeira parte).....	32
Tabela 2- Atributos químicos do perfil do solo em estudo (Segunda parte).....	33
Tabela 3 - Granulometria, argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF) e matéria orgânica (MO) nas diferentes camadas do perfil de solo	61
Tabela 4 - Pontos de efeito salino nulo (PESN) e potencial elétrico superficial (ψ_o) no pH atual de campo	62
Tabela 5 - Densidade do solo (ρ) e densidade dos sólidos do solo (ρ_s), porosidade total calculada (PT) e macroporosidade (Ma) nas diferentes camadas do perfil do solo.....	62
Tabela 6 - Parâmetros de ajuste das curvas de retenção para cada camada do perfil do solo	63
Tabela 7 - Condutividade hidráulica saturada (K_s) nas diferentes camadas do perfil do solo. Os dados correspondem à média de todos os tratamentos para cada camada	67
Tabela 8 - Parâmetros de ajuste da função $K(\theta)$ obtida pelo método do perfil instantâneo. Os coeficientes de correlação correspondem à regressão $\ln K$ vs. θ	69
Tabela 9 - Estatística descritiva dos valores de condutividade hidráulica obtidos com infiltrômetro de tensão na profundidade de 0,9 m.....	71
Tabela 10 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 1, avaliados ao longo dos períodos.....	71
Tabela 11 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 2, avaliados ao longo dos períodos.....	72
Tabela 12 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 3, avaliados ao longo dos períodos.....	72
Tabela 13 - Razão média de absorção radicular (r) em cada camada e distribuição percentual da atividade radicular.....	76
Tabela 14 - Concentração média (C, mg L ⁻¹), Concentração mínima média (C _{Mín.} , mg L ⁻¹), Concentração máxima média (C _{Máx.} , mg L ⁻¹). Percentual de ânions e cátions (%) presentes na solução do solo calculados em base molar. Percentual de ânions e cátions em C _{Mín.} e C _{Máx.} (%Mín. e %Máx.) calculados em base molar	94

Tabela 15 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 1. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m.....	106
Tabela 16 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 2. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m.....	106
Tabela 17 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m.....	107
Tabela 18 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 1. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m.....	108
Tabela 19 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 2. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m.....	108
Tabela 20 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m.....	109
Tabela 21 - Análise estatística dos componentes do balanço hídrico em diferentes períodos.....	154
Tabela 22 - Análise estatística da lixiviação macronutrientes (kg ha^{-1}) de plantas no solo em diferentes períodos. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de macronutrientes na profundidade de 0,9 m.....	155

1 INTRODUÇÃO

A fertilização dos solos com nitrogênio e enxofre é feita com o intuito de aumentar a produtividade das culturas. No entanto, a eficiência de utilização dos fertilizantes varia normalmente entre 40 e 50%, sendo que a porção não aproveitada pode permanecer no solo, ser incorporada na matéria orgânica, ser perdida para a atmosfera ou mesmo ser lixiviada para baixo da zona radicular de onde as culturas efetivamente extraem água e nutrientes (LIBARDI et al., 1982; RAUN; JOHNSON, 1999). A lixiviação tem desvantagens tanto econômicas como ambientais porque o ecossistema diminui sua produtividade, além de poder contribuir para a contaminação da água de superfície ou da água subterrânea (PIERZYNSKI; SIMS; VANCE, 1994).

A lixiviação é o resultado da liberação de íons na forma solúvel e do movimento de água no perfil do solo para removê-los, sendo a magnitude das perdas proporcional à concentração do elemento na solução no solo e ao volume de água drenado. No município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (Brasil), o balanço hídrico climatológico é positivo entre os meses de dezembro e março, o que significa que os excedentes de água podem drenar e transportar solutos para baixo da zona radicular, sendo esse período o de maior risco de perdas por lixiviação.

Diferentes trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos nas condições tropicais do Estado de São Paulo, apresentando perdas variáveis de N por lixiviação em cana-de-açúcar, com menos antecedentes com relação a perdas de S. Utilizando vasos de 220 L com solo de textura arenosa fertilizado com uréia enriquecida com ^{15}N , Trivelin et al. (2002a) e Oliveira et al. (2002) mostraram que o total de N lixiviado foi $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$, nada advindo do fertilizante (uréia), 53% dos quais ocorreram nas primeiras três semanas devido ao escasso desenvolvimento do sistema radicular da cultura. Bologna-Campbell (2007) usando fertilizante marcado com ^{15}N e ^{34}S quantificou baixa perda de N e S por lixiviação, concluindo que com o aumento das doses de N-fertilizante houve diminuição da lixiviação de S tanto da forma mineral incorporada por fertilização, como do nativo e/ou proveniente do resíduo cultural. O comportamento foi atribuído ao incremento na extração de N do fertilizante que resultou em sinergismo e aumento na extração de S pela cana-de-açúcar. É necessário destacar que o sistema radicular da cultura ficou confinado a um volume que pode não ser representativo do que ocorre em campo.

Embora as perdas de nitrogênio por lixiviação possam ser baixas, as perdas de cátions

podem ser importantes, promovendo a acidificação do solo (HARTEMINK, 2008). No estudo de Oliveira et al. (2002), mesmo com baixas perdas por lixiviação de N, registraram-se elevadas perdas por lixiviação de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} . Esses resultados concordam com a conclusão de Ng Kee Kwong e Deville (1984) que obtiveram perdas por lixiviação de cátions como Ca^{2+} e K^+ maiores que as de NO_3^- . As colocações apresentadas salientam a necessidade de implementar práticas de manejo do solo que diminuam as perdas por lixiviação tanto de nitrogênio, como também de outros nutrientes.

Em estudos de campo com cana-de-açúcar, utilizando tensiômetros e extratores de solução a 1 m de profundidade no ciclo agrícola de terceira soca, Camargo (1989) aplicou 100 kg ha^{-1} de N e determinou lixiviação de 28,2 e 7,5 kg ha^{-1} de N proveniente da uréia e de aquamônia respectivamente e baixa eficiência de uso dos fertilizantes pela cultura (14,4 a 18,4%). Em contraposição, Oliveira et al. (2000), com a mesma metodologia, não observaram nitrogênio lixiviado sendo alta a eficiência de uso do N-fertilizante anormalmente alta e da ordem do 60%. O contraste dos resultados apresentados mostram que a lixiviação é um fenômeno ligado às variações de clima, solo, estágio de desenvolvimento e ciclo agrícola da cultura.

A partir dos resultados de vários trabalhos, pode-se observar que a lixiviação acontece especialmente quando a mineralização e a absorção pela planta não estão sincronizadas e o fluxo de água é suficiente para transportar o soluto em profundidade (MEIRELLES et al., 1980; McNEILL et al., 2005; ARREGUI; QUEMADA, 2006). Thorburn et al. (2003b) fizeram o balanço de nitrogênio desde o plantio até a terceira soca de cana-de-açúcar irrigada e fertilizada com diferentes doses de N e concluíram que a maior parte das perdas foi de N mineralizado da matéria orgânica. Também a respeito da mineralização, resultados de experimentos de incubação em solo arenoso com cana-planta mostraram que podem ser liberadas importantes quantidades de N como 265 kg $ha^{-1} ano^{-1}$ de 0 a 0,6 m de profundidade (SALCEDO; SAMPAIO; ALVES, 1985). Isso evidencia a necessidade de pesquisas inovadoras que tenham como objetivo reduzir as perdas de N e S, melhorando a sincronia entre o aporte e a demanda da cultura (McNEILL et al., 2005).

No que se refere à poluição da água subterrânea associada à cultura de cana-de-açúcar, Thorburn et al. (2003a), sugere que a melhoria no manejo da fertilização nitrogenada é chave no controle da concentração de nitrato na água que pode atingir o lençol freático. No experimento de

Southwick et al. (1995), cinco dias após a aplicação de 122 kg ha^{-1} de N, o N-NO_3^- foi encontrado na sua maior concentração na água de drenagem; depois daquele primeiro evento, as concentrações permaneceram em valores inferiores a 10 mg L^{-1} (limite máximo admissível para consumo humano) a 1,0 m de profundidade. Também Oliveira et al. (2001) registraram alteração na qualidade da água de drenagem ao medir um acréscimo de 0,74 a $14,58 \text{ mg L}^{-1}$ na concentração média de N na solução no solo a 0,9 m de profundidade quando foram aplicados 0 e 120 kg ha^{-1} de N, respectivamente, em um Latossolo (Typic Hapludox).

Em vista dos efeitos negativos do processo de lixiviação, o uso de quantidades cada vez maiores de fertilizantes, a recente transformação de áreas de pastagens e de cultivo agrícola para produção de cana-de-açúcar e a necessidade de adaptar tecnologias que permitam o manejo sustentável dos recursos naturais, os objetivos do trabalho foram: (i) quantificar as perdas de nitrogênio e enxofre por lixiviação em um Latossolo Vermelho Distrófico do Estado de São Paulo (Brasil) cultivado com cana-de-açúcar durante o ciclo agrícola de primeira soca; (ii) determinar quanto do fertilizante aplicado é lixiviado e, (iii) quantificar as perdas por lixiviação de cálcio, magnésio, potássio e fósforo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

No Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, desde a criação do programa Proálcool em 1975, houve aumento da produtividade e da área cultivada com cana-de-açúcar para produção de etanol. A expansão da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar gera discussões sobre aspectos sociais e ambientais (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; HARTEMINK, 2008; URIARTE et al., 2009), com ênfase, no setor agrícola, para que sejam utilizados sistemas de manejo que evitem impactos negativos no solo, na água na atmosfera e na biodiversidade (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; MARTINELLI; FILOSO, 2008; HARTEMINK, 2008).

Nesse contexto, a fertilização com nitrogênio deve ser avaliada considerando o conceito de sustentabilidade, uma vez que, maior eficiência no uso do N tem relação direta com menor risco de poluição do lençol freático e da atmosfera, menor perda de outros nutrientes por lixiviação e menor perigo de acidificação do solo, além de incrementar a produtividade da cana-de-açúcar e diminuir os custos com fertilização.

A cana-de-açúcar produz, em cultivos contínuos no Brasil, grandes quantidades de colmos com adubações nitrogenadas relativamente modestas (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). Em cana-planta, na qual a resposta à adubação é menos freqüente que na cana-soca, as doses de N recomendadas no Estado de São Paulo variam entre 30 e 90 kg ha⁻¹ de N (RAIJ et al., 1997) sendo muitas vezes inferiores à quantidade exportada pelos colmos, como mostraram Franco et al. (2008) para as doses de 40 e 80 kg ha⁻¹ de N. Em cana-soca, variam entre 60 e 120 kg ha⁻¹ de N (RAIJ et al., 1997) dependendo do potencial de produção de fitomassa esperado, sendo a resposta à adubação com N mais freqüente que na cana-planta (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007; DEMATTÊ, 2004). O enxofre é um elemento que não tem sido considerado nos estudos de nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil e é provável que as necessidades de S de boa parte dos canaviais da região Sudeste estejam sendo satisfeitas por gessagens aplicadas com o objetivo de melhorar o subsolo (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007).

Um dos principais problemas com a fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar é a baixa recuperação do N-fertilizante (HARTEMINK, 2008), da ordem de 10 a 40% medida em condição

de campo, utilizando o traçador isotópico ^{15}N (CHAPMAN; HAYSOM; SAFFIGNA, 1994; TRIVELIN; VICTORIA; RODRIGUES, 1995; VALLIS et al., 1996). Assim, a porção não aproveitada do N pode permanecer no solo, ser incorporada na matéria orgânica, ser perdida para a atmosfera ou mesmo ser lixiviada para baixo da zona radicular de onde as culturas efetivamente extraem água e nutrientes. Estudos para determinar o destino do enxofre utilizando o traçador isotópico ^{34}S são poucos, destacando-se o de Bologna-Cambell (2007) que em cana-planta determinou um aproveitamento do S-fertilizante médio de 32%, sendo o S-fertilizante residual no solo 43% do total aplicado (70 kg ha^{-1} de S).

Em áreas de produção de cana-de-açúcar colhida sem queima prévia do canavial com o fertilizante aplicado superficialmente, as perdas por volatilização variaram entre 2,0 e $20,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N dos 70 kg de N aplicados como sulfato de amônio ou uréia, respectivamente (VITTI, A.C. et al., 2008a). Em condições experimentais similares Cantarella et al. (2008) obtiveram perdas que variaram de 1 a 25% do N-uréia aplicado (entre 80 e 100 kg ha^{-1} de N) podendo serem reduzidas utilizando inibidores da urease. As perdas pela parte aérea, que acontecem quando a concentração de NH_3 na planta estiver acima daquela da atmosfera, especialmente em condições de estresse e senescência das folhas, variaram entre 10 e 90 kg ha^{-1} de N segundo estimativas de Ng Kee Kwong e Deville (1994), Trivelin et al. (2002a) e Prasertsak et al. (2002). A desnitrificação também é frequentemente apontada como causa de importantes perdas, sendo favorecida em ambientes anaeróbicos nos quais o nitrato é reduzido a formas gasosas pelos microorganismos do solo. Na cultura de cana-de-açúcar, já se sabe que a presença de palha causa um aumento nas perdas por desnitrificação mas, segundo Cantarella, Trivelin e Vitti (2007), a real contribuição da desnitrificação nos canaviais no Brasil é um assunto que carece de pesquisas.

Como se observa, as perdas de N são variáveis dependendo de diversos fatores e a lixiviação de diferentes nutrientes não é uma exceção como se verá a seguir. A lixiviação foi apontada por Muchovej e Newmann (2004) como uma das perdas que causaram baixa eficiência no uso do N do fertilizante quando se incrementaram as doses de nitrato de amônio na primeira soca da cana-de-açúcar cultivada em solo arenoso no sul da Florida.

O glossário da SSSA (2009) estabelece que a lixiviação é a remoção de materiais solúveis pelo movimento de água de uma zona para outra do perfil do solo. As perdas por lixiviação dependem da dose aplicada e da solubilidade do fertilizante, da época de aplicação, do regime

hídrico, do tipo de solo e do desenvolvimento do sistema radicular. Sendo dependente de todos esses fatores, os resultados experimentais são muitas vezes contrastantes sendo frequente encontrar trabalhos que apontem que a lixiviação do N é pouco relevante nas condições brasileiras onde se aplicam doses de fertilizantes relativamente pequenas (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007; DEMATTÊ, 2004). Mesmo assim, os resultados devem ser cuidadosamente avaliados e generalizações não devem ser feitas a partir de estudos parciais.

A liberação do N para ser lixiviado está intimamente ligada à quantidade e tipo de resíduo cultural deixado após a colheita, assim como à solubilidade do fertilizante. Quando a colheita é realizada sem a queima prévia do canavial, Basanta et al. (2003) determinaram que foram reciclados no sistema $105 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N, mas a liberação de N seria baixa porque o resto cultural possui uma relação C/N em torno de 100, o que favorece o processo de imobilização (OLIVEIRA et al., 1999). Dessa forma, os nutrientes adicionados ao solo como resíduos orgânicos são liberados gradualmente ficando menos propensos a serem lixiviados, volatilizados ou fixados (WOOD, 1991). Destaca-se, também, que a relação C/N se estabiliza aproximadamente depois de 250 dias após a incorporação do resíduo (ROBERTSON; THORBURN, 2007), com o N liberado contribuindo pouco na nutrição da cana, independentemente se a palhada for deixada sobre o solo ou incorporada (MEIER et al., 2006).

Segundo Jansson e Pearson (1982) ocorre uma contínua transferência de N entre os compartimentos orgânico e mineral, por meio de reações de mineralização e imobilização que denominou de “*mineralization-immobilization turn over*” (MIT). Este processo tem influência na disponibilização de nutrientes para as plantas (OLIVEIRA et al., 1999; GAVA et al., 2001; TRIVELIN et al., 2002b; VITTI, A.C. et al., 2008) e Ng Kee Kwong e Deville (1987) argumentaram que a imobilização biológica limitou o movimento do nitrogênio do fertilizante para camadas profundas, mostrando a influência dos resíduos culturais na lixiviação. Por outro lado, Wong et al. (1992) verificaram que a maior parte do nitrato lixiviado era nativo e discutiram que a mineralização e nitrificação da matéria orgânica tiveram maior efeito na lixiviação de cátions básicos com a água de drenagem que o N-fertilizante, fundamentando-se assim, a importância que tem o N liberado da matéria orgânica.

Em 2007, no Estado de São Paulo, 40 % da colheita da cana-de-açúcar foi realizada sem queima prévia (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008) evidenciando a

importância de estudos que esclareçam esses aspectos. Segundo Cantarella, Trivelin e Vitti (2007) o aporte anual de grandes quantidades de palhas em áreas sem despalha à fogo permite antever a ocorrência, em médio prazo, de alterações de algumas características químicas e físicas do solo associadas ao aumento no teor de matéria orgânica, havendo poucos dados disponíveis no Brasil. Esta é uma das justificativas da realização do presente estudo.

Quanto à solubilidade e mobilidade do N-fertilizante, segundo Cantarella; Trivelin e Vitti (2007) os adubos nitrogenados mais usados na cultura de cana-de-açúcar apresentam alta solubilidade em água e são prontamente disponíveis para as plantas. Estes incluem a uréia, o nitrato e o sulfato de amônio, além de soluções como uran e aquamônia.

Wang e Alva (1996), estudando a intensidade e composição do lixiviado, simularam eventos de chuva intermitentes em colunas com solo arenoso, concluindo que: (1) mais de 88% do N total foi lixiviado quando a fonte aplicada era NH_4NO_3 ; (2) com fonte de lenta liberação de N, as perdas por lixiviação diminuíram; (3) as perdas por lixiviação de N-uréia poderiam ser pronunciadas durante os primeiros eventos chuvosos seguidos da aplicação do fertilizante. Victoria et al. (1982) observaram, em dois solos, um de textura franco-argilo-arenosa e outro de textura argilo-arenosa da Amazônia, homogêneamente acondicionados em colunas e saturados, que a uréia foi rapidamente lixiviada e uma pequena proporção do N permaneceu no solo, reforçando a ideia que durante a estação chuvosa existe perigo de perdas de N devido à elevada mobilidade do nitrogênio amídico.

Em estudos em colunas de solo, a influência das cargas positivas na adsorção de nitrato tem sido comprovada (KINJO; PRATT, 1971a; DYNIA, 2000). O transporte de ânions (nitrato, cloreto e fosfato) e cátions (cálcio, magnésio e potássio) e sua mobilidade tem sido estudados em colunas de solo altamente intemperizados por diferentes pesquisadores, destacando-se: Kinjo e Pratt (1971b), Bellini et al. (1996), Alcântara e Camargo (2005) e Allred (2008). A situação é diferente do que ocorre em solos de clima temperado, porque nas regiões tropicais e subtropicais, os solos, por terem maior grau de intemperismo, possuem mineralogia da fração argila dominada por minerais silicatados tipo 1:1 e óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001). Solos deste tipo são capazes de desenvolver cargas positivas e negativas na superfície de suas partículas, dependendo do pH e da força iônica do meio (ALLEONI; CAMARGO, 1994a e 1994b), influenciando o grau de adsorção de diferentes íons.

Dynia (2000) estudou, em laboratório, propriedades eletroquímicas, lixiviação e retenção de nitrato até aproximadamente 8,0 m de profundidade em uma topossequência na bacia do Córrego Espraiado localizada na região de Riberão Preto, Estado de São Paulo, Brasil. Nos solos pesquisados (Latossolos e Neossolos) comprovou que a retenção de nitrato foi maior em camadas profundas que na superfície. As curvas de eluição em colunas de solo reconstituído mostraram que camadas profundas do subsolo, nas quais os atributos eletroquímicos favoreceram a retenção de nitrato, requereram maior número de volumes de poros para deslocar o ânion. Em camadas superficiais, com maior conteúdo de matéria orgânica e predomínio de cargas negativas, o nitrato era excluído do sistema coloidal e perdido mais facilmente.

Mesmo sendo importantes os estudos de lixiviação de íons em colunas de solo eles são uma etapa no entendimento do movimento de solutos (ALCÂNTARA; CAMARGO, 2005). Além disso, como existem dificuldades ao extrapolar estudos de laboratório para o campo (JURY; FLÜHLER, 1992), vários métodos estão disponíveis para medir o movimento da água e solutos no perfil do solo, cada um deles envolvendo certo grau de limitação (ARMSTRONG; BURT, 1993; HENDRICKX et al., 2002). Em campo, o uso de extratores de solução do solo conjuntamente com a estimativa independente da densidade de fluxo de água no solo usando tensiômetros, tem sido utilizado com frequência (LIBARDI; REICHARDT, 1978; REICHARDT et al., 1979; CAMARGO, 1989; OLIVEIRA et al., 2000; FERNANDES; LIBARDI; CARVALHO, 2006; STEWART et al., 2006; GHIBERTO et al., 2009). Em conjunto com esses métodos é possível o uso de fertilizantes marcados com isótopos estáveis para conhecer o destino do soluto envolvido (HAUCK; BREMMER, 1976).

Diferentes pesquisas mostraram perdas variáveis de N lixiviado em culturas anuais nas condições tropicais do Estado de São Paulo com as técnicas de campo mencionadas. Em milho fertilizado com doses entre 80 e 120 kg ha⁻¹ de N marcado com ¹⁵N, registraram-se perdas entre 6,72 e 21,6 kg ha⁻¹ de N com zero a 314 g ha⁻¹ de N proveniente do fertilizante nas profundidades de 0,8 a 1,2 m (LIBARDI; REICHARDT, 1978; REICHARDT et al., 1979; FERNANDES; LIBARDI; CARVALHO, 2006). Na cultura de feijão, o N lixiviado variou entre poucos gramas em condições de drenagem reduzida (URQUIAGA-CABALLERO et al., 1986), até 15 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (1,35 kg proveniente do fertilizante) quando aplicados 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio-¹⁵N (MEIRELLES; LIBARDI; REICHARDT, 1980). Também em feijão, Libardi et al. (1982) avaliaram o destino do N aplicado na primeira de três culturas consecutivas concluindo que: (1)

houve baixa utilização do N-fertilizante (44%), (2) grande quantidade de N permaneceu no perfil do solo ficando disponível para lixiviação e possível poluição do lençol freático, (3) o pulso de fertilizante aplicado na primeira cultura ultrapassou 1,2 m de profundidade no final da segunda.

Não são muitos os trabalhos que avaliam no campo a lixiviação do N e de outros nutrientes em solos tropicais cultivados com cana-de-açúcar. Usando tensiômetros e extratores de solução a 1,0 m de profundidade no ciclo agrícola da terceira soca, Camargo (1989) aplicou 100 kg ha⁻¹ de N e encontrou perdas de 28,2 kg ha⁻¹ de N-uréia e 7,5 kg ha⁻¹ de N proveniente da aquamônia, além de uma baixa eficiência no uso do fertilizante (14,4 a 18,4% respectivamente). Em contraste, Oliveira et al. (2000) não conseguiram medir nitrogênio lixiviado com o mesmo método, sendo a eficiência de uso do N do fertilizante elevada (60%).

Nos estudos de Salcedo; Sampaio e Carneiro (1988) e Ghiberto et al. (2009a), em solos com elevado conteúdo de areia e estação chuvosa bem marcada, a lixiviação do nitrogênio proveniente do fertilizante não foi além de 2% do N aplicado, mas o total (nativo + proveniente do fertilizante) variou entre 18 e 28 kg ha⁻¹ de N com doses de 120 e 60 kg ha⁻¹ de N-uréia, respectivamente. Vale salientar que no trabalho de Salcedo; Sampaio e Carneiro (1988) a aplicação do fertilizante foi de 60 kg ha⁻¹ de N no plantio e, em outro tratamento, de 20 kg ha⁻¹ de N no plantio e 40 kg ha⁻¹ de N três meses após; concluíram que com aplicação parcelada de N as perdas por lixiviação foram menores mas que não foram vantajosas quanto à produção da cana-de-açúcar (SALCEDO; SAMPAIO, 1984).

Em estudos usando vasos de 220 L com solo de textura arenosa, a quantidade de N lixiviada foi baixa e não se encontraram perdas mensuráveis de N-uréia, as quais ocorreram nas primeiras três semanas, provavelmente devido ao escasso desenvolvimento do sistema radicular e a maior precipitação nesse período (OLIVEIRA et al., 2002; TRIVELIN et al., 2002a; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007). Embora as perdas de nitrogênio por lixiviação possam ser baixas, as perdas de outros cátions podem ser importantes, promovendo a acidificação do solo (HARTEMINK, 2008). No trabalho de Oliveira et al. (2002), o N lixiviado não foi considerável, mas as perdas de K, Ca e Mg foram importantes. Resultados similares foram obtidos por Ng Kee Kwong e Deville (1984), os quais ressaltaram a necessidade de implementar práticas de manejo do solo na cultura de cana-de-açúcar, que diminuam as perdas por lixiviação tanto de nitrogênio, como também de outros nutrientes.

Solos com baixa capacidade de troca de cátions e com limitada capacidade de reter macronutrientes como Ca, Mg e K, associados com as elevadas precipitações pluviais dos climas tropicais podem conduzir a importantes perdas por lixiviação dos cátions mencionados (POSS; SARAGONI, 1992; WONG; KRUIJS; JUO, 1992; PAUL; NG KEE KWONG; DEVILLE, 1998). Em estudo em lisímetros de concreto (2,0 m de altura x 1,5 de largura x 1,0 m de profundidade), em dois locais com 1550 e 3700 mm de anuais de chuva, Paul; Ng Kee Kwong e Deville (1998) estudaram a lixiviação de Ca, Mg e K quando eram adicionados 140 kg ha^{-1} de K_2O em uma aplicação ou parcelada em duas. Os lisímetros foram cultivados com cana-de-açúcar por um período de dois anos. A aplicação de K acelerou a perda de Ca e Mg, que esteve compreendida entre 200 e 300 kg ha^{-1} de Ca e entre 20 e 60 kg ha^{-1} de Mg, comportamento atribuído ao fato de o K deslocar o Ca e Mg de sítios de adsorção. Poss e Saragoni (1992) explicaram a maior perda por lixiviação de Ca e Mg em camadas superficiais em um Latossolo (Typic Eutruxox) pela afinidade por sítios de adsorção, tanto pelo K adicionado como fertilizante, como pelo próton liberado na converção de amônio para nitrato da uréia e da matéria orgânica. Também no trabalho de Wong et al. (1992) a aplicação de uréia incrementou a quantidade de nitrato lixiviada, correspondendo-se com o acréscimo nas quantidades de Ca e Mg perdidos na água de drenagem em lisímetros cultivados com milho.

Como a permanência de um nutriente no solo depende do equilíbrio entre processos de entrada e saída do sistema solo planta, a demanda por água e nutrientes pela cana-de-açúcar deve ser considerada. A esse respeito, Poss e Saragoni (1992) mostraram que favorecer o crescimento do milho, especialmente com uma fertilização balanceada, pode atenuar as perdas de nitrato, cálcio, e magnésio por lixiviação e a acidificação do solo para uma dada quantidade de uréia aplicada.

Analisando as necessidades de nutrientes da cana-de-açúcar, Trivelin et al. (2002b) estimaram que entre 2,1 e 2,4 g de N foram demandados para produzir 1 kg de colmo ou, entre 1,6 e 1,7 g de N por kg de colmo levando em conta apenas a parte aérea das plantas. Esses dados indicaram que a cana-de-açúcar demandou mais de 200 kg ha^{-1} de N para uma produção de 100 Mg ha^{-1} de colmos, dos quais 90 a 100 kg ha^{-1} são exportados para a indústria (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007). No caso do enxofre são necessários entre 40 e 50 kg de S para produzir 100 Mg de colmos (MALAVOLTA, 1994), exigência menor que a observada para o nitrogênio. Segundo Demattê (2004) a cultura de cana-de-açúcar é grande extratora de nutrientes e,

utilizando dados da literatura, demonstra que para produzir 1,0 Mg de colmo são necessários 0,90 a 1,32 kg de N; 0,20 a 0,69 kg de P_2O_5 ; 1,2 a 1,8 kg de K_2O ; 0,70 a 0,95 kg de CaO; 0,56 a 0,86 kg de MgO e 0,30 a 0,36 de S.

Em vários trabalhos de pesquisa no Estado de São Paulo pode-se observar que a fase logarítmica de crescimento da cana-de-açúcar coincide com a época de precipitação pluvial máxima (CAMARGO, 1989; GAVA et al., 2001; FARONI, 2008; FRANCO, 2008; OLIVEIRA et al., 2009) podendo atenuar as perdas por lixiviação. Ng Kee Kwong e Deville (1987) concluíram ser conveniente aplicar o N fertilizante durante a fase de crescimento ativo da cana-de-açúcar por observarem uma melhoria na utilização do fertilizante pela cultura. Nesse trabalho não se observaram problemas de movimento descendente de nitrogênio por causa da imobilização biológica (KEE KWONG; DEVILLE, 1984). Deve destacar-se que o trabalho de Ng Kee Kwong e Deville (1987) foi conduzido nas Ilhas Maurício em uma região com 800 mm ano⁻¹ de precipitação pluvial, dos quais 70% (560 mm) concentram-se entre novembro e abril, situação diferente à de São Paulo (Brasil) onde as precipitações nesse mesmo período são superiores (SENTELHAS et al., 2009).

A demanda de nutrientes, além do N, foi quantificada em cana-planta também por Franco (2008). Nesse trabalho, os resultados mostraram que foram exportados 141 Mg ha⁻¹ de massa de colmo úmido industrializável, contendo 91 kg ha⁻¹ de N; 22 kg ha⁻¹ de S; 14 de kg ha⁻¹ de P; 36 kg ha⁻¹ de Ca; 321 kg ha⁻¹ de K; 21 kg ha⁻¹ de Mg. No mesmo experimento, Ghiberto et al. (2009a) observaram que a soma do total de N lixiviado (18 kg ha⁻¹ de N) com o exportado foi 109 kg ha⁻¹, 11 kg ha⁻¹ a menos que a quantidade aplicada de N-fertilizante, sem ainda considerar possíveis perdas por desnitrificação, volatilização e exudação da cultura. Foram lixiviados 10,3 kg ha⁻¹ de enxofre, portanto, o balanço de S foi negativo pelo fato de não ter ocorrido aportes por fertilização ou aplicação de gesso agrícola. Também para potássio as perdas por lixiviação (66,5 kg ha⁻¹) e exportação foram superiores às entradas, enquanto que o aporte de P, com o fertilizante, e de Ca e Mg, com a calagem, foram maiores que as perdas do sistema por exportação e lixiviação.

No experimento de Sampaio, Salcedo e Bettany (1984), mencionado anteriormente, com precipitação pluvial no período de janeiro a março de 422 mm e as raízes passando de 0,6 a 0,8 m de profundidade, foram produzidas 70 Mg ha⁻¹ de massa úmida e absorvidos 105 kg ha⁻¹ de N.

Entre dezembro e abril observaram uma maior oscilação no conteúdo de água e na concentração de N a 1,1 m de profundidade associados as chuvas esporádicas intensas e a condições favoráveis à evapotranspiração (SALCEDO; SAMPAIO; CARNEIRO, 1988). As perdas totais registradas de N até o fim de abril totalizaram 12 e 6 kg ha⁻¹ de N para os experimentos com aplicação única e parcelada, respectivamente.

O efeito da absorção radicular da cana-de-açúcar também foi estudado por Salcedo e Sampaio (1984). Os autores encontraram que nas parcelas fertilizadas com 60 kg ha⁻¹ de N no plantio a acumulação de N-NO₃⁻ foi maior a 0,4 m de profundidade. Salcedo e Sampaio (1984) observaram regiões de empobrecimento e acumulação do N-NO₃⁻. Até três meses de idade da cana a absorção foi mais intensa nos primeiros 0,4 m de profundidade, onde se localiza a maior proporção de raízes. Os autores ressaltaram que nesse período no tratamento não fertilizado as plantas retiraram N também na profundidade de 0,6 m devido, provavelmente, à insuficiência de N-NO₃⁻. Entre 3 e 6 meses de desenvolvimento da cana-de-açúcar, associado à maior demanda de N pela cultura, as raízes cresceram para camadas mais profundas com aumento em profundidade da região de empobrecimento. Embora o maior empobrecimento tenha sido registrado na região central dos sulcos, a absorção foi também no sentido de amostragem lateral. Estes dados mostram a importância de manter a qualidade física e química do solo que permita às raízes explorá-lo sem limitações contribuindo com a reciclagem de nutrientes.

Além da lixiviação abaixo da zona radicular representar uma perda de nutrientes para as culturas, a fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar foi associada à poluição do lençol freático com nitrogênio (RASIAH; ARMOUR, 2001; RASIAH et al., 2003; THORBURN et al., 2003b; MUCHOVEJ; NEWMAN, 2004), assim como ao aumento na concentração de N da solução no solo na zona radicular, a níveis superiores ao limite máximo aceitável para consumo humano (10 mg L⁻¹) (SOUTHWICK et al., 1995; OLIVEIRA et al., 2001). Portanto, a melhoria no manejo da fertilização nitrogenada é chave no controle da concentração de nitrogênio no lençol freático (THORBURN et al., 2003b) e são necessárias pesquisas nesses aspectos. Apesar das colocações realizadas, Dynia (2000) mostrou em solos do estado de São Paulo, Brasil, que em camadas profundas dos solos da topossequência estudada os atributos eletroquímicos favoreceram a acumulação de nitrato, sendo um indicativo de que o risco de que atinja o lençol freático pode ser diminuído.

Considerando que são poucos os trabalhos nos quais se avalia a lixiviação de nutrientes por meio do monitoramento direto em campo na cultura de cana-de-açúcar e a importância de gerar informação que permita planejar práticas de manejo sustentáveis, foi realizado o presente trabalho de pesquisa.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área de estudo

O experimento foi conduzido na área de produção de cana-de-açúcar da Usina Santa Adélia localizada no município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (SP), Brasil, a 21° 20' 20'' de latitude sul, 48° 18' 35'' de longitude oeste e 608 m de altitude. A região forma parte da Bacia Sedimentar do Paraná correspondendo com a unidade morfoescultural denominada Planalto Residual de São Carlos. O Planalto Residual de São Carlos tem altitude predominante entre 500 e 900 m, colinas com topos aplanados e declividades que variam de 2 a 20% na maior parte da área. As litologias dominantes são depósitos arenosos e argilosos e os solos são do tipo Latossolo Vermelho-Escuro (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981).

O solo onde se efetuaram as avaliações foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2006) (Arenic Kandistults) de textura franco-argilo-arenosa (Tabela 1, Tabela 2 e Figura 1) com o lençol freático a mais de 7 m de profundidade. A declividade do terreno onde foi instalado o talhão experimental varia entre 2 e 4% como mostram os resultados do levantamento planialtimétrico mostrado no Anexo A.

Tabela 1 - Atributos químicos do perfil do solo em estudo (Primeira parte)

Horizonte	Prof. (m)	pH			P (mg kg ⁻¹)	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC
		H ₂ O	KCl	ΔpH								
A _p	0,15	6,0	4,5	-1,5	10	0,01	3,6	18	13	-	17	51,6
A ₂	0,37	6,3	5,2	-1,1	11	0,01	2,2	9	5	2	18	34,2
BA	0,56	5,1	4,1	-1,0	3	0,01	1,2	2	1	8	31	35,2
B _{w1}	0,96	5,6	4,4	-1,2	1	0,01	0,9	3	1	3	20	24,9
B _{w2}	0,96+	5,9	5,1	-0,8	1	0,01	3,5	2	1	-	9	15,5

pH_{H2O}: pH em água relação 1:2,5; pH_{KCl}: pH em KCl 0,1 N relação 1:10; ΔpH= pH_{KCl}- pH_{H2O}; P: extração por resina trocadora de íons e determinação por colorimetria; K, Ca, Mg, Na: extração por resina trocadora de íons e determinação por espectrometria de absorção atômica; H+Al: determinação por potenciometria em solução tampão SMP; CTC: capacidade de troca catiônica. Amostragem realizada no ciclo agrícola de cana-planta em 18/07/2006.

Tabela 2- Atributos químicos do perfil do solo em estudo (Segunda parte)

Horizonte	Prof. (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	TiO ₂	MnO	k _i	k _r	Al ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃
A _p	0,15	85,1	113,9	49,3	8,8	0,4	1,27	0,99	2,31
A ₂	0,37	76,1	124,3	52,7	9,3	0,4	1,04	0,82	2,36
BA	0,56	98,0	142,5	57,4	10,8	0,4	1,17	0,93	2,48
B _{w1}	0,96	88,1	147,6	59,9	11,2	0,4	1,01	0,81	2,46
B _{w2}	0,96+	86,5	150,7	59,5	11,4	0,4	0,98	0,78	2,53

k_i = SiO₂/Al₂O₃; k_r = SiO₂/(Al₂O₃+Fe₂O₃). Amostragem realizada no ciclo agrícola de cana-planta em 18/07/2006.

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw: Tropical de Savana. Com base nos dados meteorológicos de 30 anos do local, Sentelhas et al. (2009) mostram que a temperatura média anual é 22,6 °C e a média anual de precipitações pluviais de 1333 mm, concentradas entre dezembro e março (853 mm). Os autores estimaram, pelo método Thornthwaite e Matter (1955), que a evapotranspiração potencial anual é de 1115 mm e a real de 987 mm. Entre dezembro e março as chuvas excedem a evapotranspiração potencial e se produz um excedente hídrico de 346 mm calculado usando o balanço hídrico climatológico, considerando uma capacidade de água disponível de 100 mm até 1,0 m de profundidade (SENTELHAS et al., 2009). Em síntese, a Figura 2 mostra os períodos de deficiência, excedente, retirada e reposição de água do solo calculados pelo balanço hídrico climatológico.

Descrição morfológica dos horizontes

A_{p1} 0 – 15 cm – Bruno avermelhado escuro (2,5YR 3/4, úmido; 2,5YR 4/6, seco); textura média a argilosa; estrutura, granular média e grau moderado; consistência molhado plástica e pegajosa; friável em úmido; muito dura em seco; transição clara e plana. Raízes: muitas e finas.

A₂ 15 – 37 cm – Vermelho escuro (2,5YR 3/6, úmido); argilosa; estrutura em blocos médios, grau moderado; consistência em molhado plástica e pegajosa, friável a firme em úmido e ligeiramente dura em seco; transição clara e plana. Raízes: muitas, médias e finas.

BA 37 – 56 cm – Vermelho escuro (2,5YR 3/6, úmido); textura argilosa; estrutura em blocos médios, grau forte; consistência em molhado plástica e ligeiramente pegajoso, friável em úmido e ligeiramente dura em seco; transição gradual e plana. Raízes: comuns e médias.

Bw₁ 56 – 96 cm – Vermelho escuro (2,5YR 3/6, úmido); textura argilosa; estrutura em blocos médios grau forte; consistência em molhado plástica e pegajosa, friável em úmido e ligeiramente dura em seco; transição gradual e plana. Atração magnética moderada. Raízes: poucas e médias.

Bw₂ 96+ cm – Vermelho escuro (2,5YR 4/6, úmido); textura média a argilosa; estrutura em blocos pequenos grau forte; consistência ligeiramente plástico e pegajoso em molhado; friável em úmido e ligeiramente dura em seco. Atração magnética baixa. Raízes: raras e médias.

Figura 1 - Descrição morfológica do perfil do solo. Descrição realizada em 18/7/2006, na linha da soqueira seguindo o procedimento de Santos et al. (2005).

Figura 2 - Balanço hídrico climatológico ao longo do ano. Fonte: Sentelhas et. al (2009)

2.2.2 Delineamento experimental

O experimento consistiu na quantificação da lixiviação de nitrogênio e enxofre, tanto nativo como proveniente do fertilizante, além de outros cátions e ânions acompanhantes sob cultivo de cana-de-açúcar (cultivar SP81-3250) no ciclo agrícola de primeira soca.

O trabalho esteve inserido no Projeto Temático intitulado “Rendimento da cana-de-açúcar em ciclos consecutivos, no sistema de plantio direto, associado ao efeito residual e às transformações de N e S no solo” financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que teve início em 2005. Antes da instalação do experimento, a área tenha um histórico de duas colheitas nas safras anteriores sem queima da cana-de-açúcar realizadas com máquina colhedora. Três anos anteriores à instalação do experimento, em 2002, foi suspensa a aplicação de vinhaça.

O desenho experimental do experimento no projeto temático consistiu de 4 blocos casualizados, 4 tratamentos e 4 repetições por tratamento em cada ciclo agrícola da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar foi plantada entre 4 e 8 de abril de 2005. As operações de reforma do canavial foram: dessecação da soqueira do ciclo anterior com aplicação de 4 L ha^{-1} do herbicida glifosato, aração profunda e incorporação dos resíduos vegetais. O solo recebeu 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico e posteriormente foi gradeado para o nivelamento antes da sulcação e plantio. No primeiro ano (ciclo agrícola de cana-planta), os tratamentos consistiram da fertilização da cana-de-açúcar nas doses de 40, 80 e 120 kg ha^{-1} de N na forma de uréia aplicados no fundo dos sulcos de plantio, além de um tratamento testemunha sem adubação com N (0 kg ha^{-1} de N). Foram aplicados também, 120 kg ha^{-1} de K_2O e P_2O_5 com as fontes cloreto de potássio (KCl) e superfosfato triplo, respectivamente (FRANCO, 2008; FARONI, 2008).

A colheita da cana-planta foi efetuada entre 11 e 13 de julho de 2006. A produção de colmo industrializável foi de 145 Mg ha^{-1} na testemunha e de 144, 147 e 146 Mg ha^{-1} para as doses de 40; 80 e 120 kg ha^{-1} de N respectivamente, com 74% de umidade (FRANCO, 2008). Os resultados referentes ao balanço hídrico e à lixiviação de nutrientes no ciclo agrícola de cana-planta encontram-se publicados em Brito, Libardi e Ghiberto (2009) e Ghiberto et al. (2009a), respectivamente.

No segundo ano, já no primeiro ciclo agrícola de cana-soca, no dia 1 de novembro de 2006, foi aplicado sulfato de amônio manualmente sobre a palha residual da colheita, a 0,2 m da soqueira. Neste ciclo agrícola, os tratamentos consistiram de uma testemunha sem aplicação de fertilizante e de três tratamentos com aplicação de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N e correspondentemente, de 57; 114 e 172 kg ha⁻¹ de S. A aplicação de fertilizante na primeira soca foi realizada levando em consideração os tratamentos do ciclo de cana-planta, resultando nas seguintes combinações para o primeiro e segundo ano respectivamente: 0→0; 40→50; 80→100 e 120→150 kg ha⁻¹ de N. Em cada parcela, foram aplicados também, 120 kg ha⁻¹ de K₂O com a fonte cloreto de potássio (KCl).

No presente trabalho, para a avaliação da lixiviação, foram estabelecidos 3 tratamentos distribuídos nos quatro blocos ao acaso com uma repetição por bloco (Figura 3). Os tratamentos para avaliar a lixiviação consistiram da combinação na aplicação de nitrogênio nos períodos de cana-planta e primeira soca da seguinte maneira: Tratamento 1 (T₁): 0→0 kg ha⁻¹ de N; Tratamento 2 (T₂): 80→100 kg ha⁻¹ de N e Tratamento 3 (T₃): 120→150 kg ha⁻¹ de N. Para conhecer o destino do N e do S provenientes do fertilizante, foram instaladas quatro microparcels de 2,0 m de linha de plantio, isto é, de dimensões 2 m x 1,5 m tendo em vista o espaçamento entre linhas de 1,5 m (TRIVELIN et al., 1994). Nas microparcels o fertilizante foi aplicado na forma de solução contendo cloreto de amônio e sulfato de potássio enriquecidos com os isótopos estáveis ¹⁵N (2,15 átomos %) e ³⁴S (10,5 átomos %). A quantidade de KCl aplicada foi equivalente a 120 kg ha⁻¹ de K₂O. O fertilizante marcado foi produzido pelo Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Energía Nuclear na Agricultura (USP) segundo procedimento descrito em Maximo et al. (2005).

A quantificação das entradas e saídas dos íons avaliados a 0,9 m de profundidade foi feita diariamente, utilizando tensiômetros e extratores de solução com cápsula porosa para avaliar a densidade de fluxo de água e a concentração de nitrito, nitrato, amônio, sulfato, fosfato, cálcio, magnésio, potássio, cloreto, bicarbonato e fluoreto além do ¹⁵N e ³⁴S na solução do solo. A Figura 3 mostra um croqui da área experimental onde pode se observar os locais de instalação dos equipamentos nas diferentes parcelas e detalhes das microparcels onde se utilizou o fertilizante marcado com isótopos estáveis.

Figura 3 - Croqui da área experimental

Face aos parâmetros necessários para quantificar a lixiviação dos solutos avaliados, houve necessidade das seguintes determinações: curva de retenção hídrica e condutividade hidráulica em função do conteúdo volumétrico de água do solo a 0,9 m, fluxo de água diário e concentração

de íons na solução do solo. Outras determinações, não ligadas diretamente à quantificação da lixiviação, mas importantes por fornecer subsídios para interpretação dos resultados, foram também feitas: condutividade hidráulica saturada, curva de retenção hídrica, resistência mecânica à penetração das raízes, densidade do solo, granulometria, argila dispersa em água e carbono orgânico no perfil do solo por camadas até 1,05 m de profundidade, além de atributos eletroquímicos em duas camadas do solo. Também foi efetuado o balanço hídrico da cultura para relacionar a demanda por água com a perda de nutrientes por lixiviação. Os procedimentos utilizados são relatados a seguir.

2.2.3 Atributos físicos e físicoquímicos do solo

Coletaram-se amostras deformadas e indeformadas das parcelas onde se instalaram os conjuntos de tensiômetros e extrator de solução (Figura 3). As amostras indeformadas foram extraídas em anéis de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro no centro das camadas de 0 – 0,15; 0,15 – 0,25; 0,25 – 0,35; 0,35 – 0,45; 0,45 – 0,55; 0,55 – 0,65; 0,65 – 0,75; 0,75 – 0,85; 0,85 – 0,95 e 0,95 – 1,05 m. Utilizou-se um extrator tipo Uhland (BLAKE; HARTGE, 1986) e um total de 130 amostras ((12 parcelas + 1 bordadura) x 10 profundidades) foram coletadas. Uma vez extraídas, as amostras eram embrulhadas em filme de plástico para evitar perda de água e logo em papel alumínio para proteção durante o transporte e processamento no laboratório (Figura 4). Até o momento do processamento foram armazenadas a 4°C para neutralizar efeito dos organismos do solo.

Estas amostras foram utilizadas para determinar posteriormente: porosidade total; condutividade hidráulica saturada; curva de retenção hídrica; densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração das raízes (itens 2.2.3.1; 2.2.3.2.1; 2.2.3.3; 2.2.3.4 e Anexo B). Para processá-las foram agrupadas de modo que o número de amostras de cada grupo era igual ao número necessário para fazer a determinação de um ponto da curva de retenção hídrica (item 2.2.3.3). Posteriormente o excesso de solo de cada anel foi eliminado, utilizando uma faca dentada para evitar danificar o sistema de poros nos extremos da amostra e, na parte inferior do anel colocou-se um pano prendido com elástico. O excesso de solo de cada anel foi individualmente armazenado em sacos de plástico.

Finalizadas as determinações com as amostras indeformadas, o excesso de solo e o conteúdo do anel foram utilizados para determinar: granulometria, argila dispersa em água e conteúdo de carbono orgânico (item 2.2.3.5). Para isso, cada amostra foi moída, peneirada em malha de 2 mm e armazenada em sacos plásticos até o momento da determinação. Além dessas determinações, nas camadas de 0 – 0,15 e 0,95 – 1,05 m foram medidos atributos eletroquímicos do solo com amostras deformadas compostas de todas as parcelas.

Figura 4 – Coleta de amostras indeformadas no solo

2.2.3.1 Porosidade total

Cada grupo de amostras indeformadas, mencionado anteriormente, foi saturado usando água deaerada por um período de 48 horas. Para isso, foram colocadas numa bandeja, adicionada nesta uma lâmina de aproximadamente 1,0 cm de água e deixadas em repouso para que a água ascendesse por capilaridade. Nas 24 horas seguintes colocou-se água na bandeja progressivamente até atingir o topo da amostra. Posteriormente, determinou-se o peso do solo saturado de cada amostra colocando-a em um recipiente com água, previamente tarado. O peso do solo saturado, do solo seco (item 2.2.3.3) e a densidade da água foram utilizados, para calcular o conteúdo volumétrico de água de saturação e, portanto, a porosidade total do solo. A porosidade total do solo também foi estimada utilizando a densidade do solo e a densidade dos

sólidos a fim de serem utilizadas no ajuste das curvas de retenção de hídrica de cada camada. O método de cálculo dos atributos mencionados pode ser encontrado em Libardi (2005).

2.2.3.2 Condutividade hidráulica

2.2.3.2.1 K_s medida pelo método do permeâmetro de carta decrescente

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_s) foi determinada a partir da equação de Darcy-Buckingham pelo método da carga decrescente. A seguir relata-se o procedimento utilizado, que foi repetido para cada amostra depois de serem pesadas para determinar o conteúdo de água do solo saturado (item 2.2.3.1).

Imediatamente depois de determinado o peso saturado, secava-se a parte externa do anel da amostra e em seguida era colado com fita um anel do mesmo diâmetro, na parte superior, dentro da qual, apoiada à superfície da amostra, colocava-se uma estrutura de arame conforme a Figura 5a. O conjunto era colocado dentro de um recipiente contendo pedrisco no fundo com o orifício de saída de água inicialmente fechado. Depois, o recipiente era preenchido com água até atingir o topo da amostra de solo. Posteriormente, colocava-se água na parte superior do conjunto usando uma pisseta, cuidando para não danificar a parte superior da amostra e, finalmente completava-se com água o recipiente até o topo do conjunto (Figura 5b). O seguinte passo (Figura 5c) era abrir a saída de água do fundo do recipiente e deixar drenar a água dentro do conjunto medindo o tempo que a água levava para descer desde t_i (tempo inicial) até t_f (tempo final) (Figura 5d). Com os dados coletados, calculava-se a condutividade hidráulica saturada pela expressão a seguir:

$$K_s = \frac{L}{(\Delta t)} \ln \left(\frac{H_1}{H_2} \right), \quad (1)$$

sendo $\Delta t = t_f - t_i$, o intervalo de tempo durante o qual uma coluna de água no topo da amostra diminui de H_1 para H_2 e, L , o comprimento da amostra de solo.

Terminado o ensaio para determinar K_s , com o mesmo grupo de amostras determinaram-se as curvas de retenção hídrica conforme o procedimento descrito no item 2.2.3.3.

2.2.3.2.2 K medida utilizando infiltrômetro de tensão

A condutividade hidráulica do solo (K) foi medida a 0,9 m de profundidade em 4 trincheiras correspondentes aos diferentes blocos com infiltrômetro de tensão (PERROUX; WHITE, 1988) nas tensões (τ) de 0,6 cm_{H₂O} ($K_{0,6}$), 2,5 cm_{H₂O} ($K_{2,5}$), 5 cm_{H₂O} (K_5) e 10 cm_{H₂O} (K_{10}). Utilizou-se o procedimento proposto por Ankeny et al. (1991) fazendo-se 12 repetições para cada tensão (4 por trincheira). No ato da medição, foi adotada uma seqüência descendente de tensões porque uma ascendente pode causar histereses (JARVIS; MESSING, 1995).

Antes de colocar o infiltrômetro de tensão no solo, uma superfície de aproximadamente 60 cm de diâmetro foi limpada e nivelada sem alterar a estrutura do solo. Posteriormente, uma fina camada de areia era aplicada na superfície do solo, cobrindo uma área idêntica a do disco do infiltrômetro de tensão (7,6 cm de diâmetro). Com o objetivo de assegurar um apropriado contato hidráulico entre o disco e o solo, o infiltrômetro de tensão era levemente pressionado sobre a superfície de areia. Depois de molhada a areia, (30 segundos), eram efetuadas as medições em intervalos de 30 segundos. Cada teste era concluído quando pelo menos 5 leituras consecutivas tiveram resultados similares. Nesse momento era considerado o equilíbrio estacionário. As leituras foram utilizadas para realizar os cálculos de K de acordo com a Ankeny et al. (1991). O tempo para alcançar o equilíbrio estacionário foi aproximadamente de 30 minutos nas tensões mais altas e decresceu nas mais baixas. Detalhes do procedimento de uso do equipamento e método de cálculo de K podem ser encontrados em Ghiberto (1999).

2.2.3.2.3 K medida pelo método do perfil instantâneo

Para se conhecer a relação da condutividade hidráulica com o conteúdo volumétrico de água, o solo foi submetido a um estudo de drenagem interna para obter os parâmetros K_0 , γ , e θ_0 , da eq. (2),

$$K(\theta) = K_0 \exp \gamma(\theta - \theta_0), \quad (2)$$

utilizando o método do perfil instantâneo (HILLEL; KRENTOS; STYLIANOV, 1972). Na eq. (2), K_0 é a condutividade hidráulica correspondente ao conteúdo de água volumétrico θ_0 , no tempo zero de redistribuição.

Como o método exige que sejam satisfeitas as condições de contorno a seguir, durante o processo de redistribuição,

$$\begin{cases} \theta = \theta(z), & t = 0, & z = 0 \\ \theta = \theta_n, & t > 0, & z = \infty \\ q = 0, & t > 0, & z = 0 \end{cases}$$

foi demarcada uma área circular de 3,0 m de diâmetro confinada por uma chapa galvanizada de 1,2 m de altura inserida no solo até cerca de 0,8 m. No centro da área foram instalados tensiômetros nas profundidades de 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 e 1,0 m (Figura 6).

Por ocasião do início do ensaio de condutividade hidráulica, foram adicionados aproximadamente 10 m³ de água, quantidade estimada para saturar o solo até um metro de profundidade. Terminada a infiltração, a área foi coberta com duas capas plásticas de polietileno, uma colocada acima da outra, sendo a inferior circular de 3,0 m de diâmetro e a superior de 6x6 m², para satisfazer a condição de ausência de fluxo de água na superfície (evaporação e entrada de água proveniente de chuvas ou escoamento superficial na zona confinada). O plástico foi perfurado para dar passagem aos tensiômetros e manômetros e em seguida procedeu-se a sua amarração em torno dos equipamentos.

A drenagem interna foi observada por meio das leituras dos tensiômetros com vacuômetro de Bourdon e os valores das leituras foram transformados em potencial mátrico. O tempo inicial (t=0) foi considerado aquele no qual as leituras dos manômetros corresponderam ao potencial zero. A partir desse momento foram realizadas leituras espaçadas por intervalos de uma hora no início e depois diárias quando as variações das leituras eram menores. O experimento estendeu-se por aproximadamente 35 dias e foi suspenso quando as variações nas leituras eram extremamente reduzidas. As leituras eram realizadas invariavelmente entre as 7h 30min e 8h 30min da manhã, por uma questão de homogeneidade de temperatura. As leituras dos tensiômetros foram transformadas em potencial mátrico segundo procedimento sugerido por Brito et al. (2009).

Os respectivos valores de conteúdo volumétrico de água no solo nos diversos tempos de drenagem foram inferidos a partir das curvas de retenção determinadas em laboratório (item 2.2.3.3). Com os dados do potencial mátrico e do conteúdo de água com o tempo obteve-se a condutividade hidráulica na forma da eq. (2) para cada camada utilizando o procedimento descrito em Libardi (2005).

Figura 5 - Esquema do arranjo experimental para determinação de K_s pelo método de carga decrescente.

Figura 6 - Arranjo experimental no método do Perfil Instantâneo. Área circular de 3 m de diâmetro confinada por uma chapa galvanizada de 1,2 m de altura inserida no solo até cerca de 0,8 m. No centro da área os tensiômetros

2.2.3.3 Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo (CR) foi confeccionada para cada camada nos potenciais -10; -20; -30; -40; -60; -80; -100 cm_{H2O} em mesa de tensão, e -300, -500, -1000, -3000, -6000 e -15000 cm_{H2O} em câmaras de Richards utilizando-se uma amostra indeformada para determinar cada ponto. Levando em consideração a diferente localização das parcelas, os anéis de cada profundidade foram distribuídos de maneira que tensões consecutivas fossem determinadas com amostras espacialmente bem distanciadas, para incluir da melhor maneira nas curvas, a variabilidade espacial.

Na mesa de tensão, para garantir o contato amostra-areia, foi colocada uma película de água com uma pisseta no local onde posteriormente era depositada a amostra. Para colocar a amostra, primeiro se apoiou uma borda e lentamente o resto, evitando-se que ar ficasse aprisionado na zona de contato. Para diminuir a evaporação tanto da mesa de tensão como das amostras, colocou-se papel toalha levemente umedecido acima das amostras e fechou-se a mesa de tensão com uma tampa. O procedimento para colocar as amostras na câmara de pressão de Richards foi semelhante à mesa de tensão. Previamente à operação nas câmaras de pressão de Richards foi testado o correto funcionamento das placas porosas.

Depois de atingida a condição de equilíbrio as amostras foram retiradas do equipamento, pesadas e realizados os testes de resistência à penetração, detalhados no Anexo B. Posteriormente, as amostras ficaram em estufa por 72 horas a 65°C para determinação do peso de solo seco. Finalmente, determinou-se o conteúdo de água gravimétrico e volumétrico calculado como mostra Gardner (1986). Os dados obtidos foram ajustados eq. (3) (GENUCHTEN, 1980) utilizando o programa RETC Version 6.0 (GENUCHTEN et al., 1998)

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[1 + (\alpha |\psi_m|)^n \right]^{-m} \quad (3)$$

sendo θ_s o conteúdo de água de saturação; θ_r o conteúdo de água residual; α (cm⁻¹), n e $m = (1 - 1/n)$ parâmetros de ajuste e ψ_m o potencial mátrico.

2.2.3.4 Densidade do solo

A densidade do solo (ρ) foi determinada usando a massa do solo seco das amostras indeformadas contidas nos anéis volumétricos (BLAKE; HARTGE, 1986). Uma vez acabadas as determinações com os anéis volumétricos, cada amostra foi moída, peneirada com malha de 2 mm de abertura e armazenada individualmente como relatado.

2.2.3.5 Granulometria, argila dispersa em água e carbono orgânico

As amostras indeformadas obtidas com o procedimento explicado no item 2.2.3 foram utilizadas para determinar a granulometria de cada uma das camadas de todas as repetições do experimento. A areia foi separada por peneiramento e utilizou-se o método da pipeta para determinar o conteúdo de argila (GEE; OR, 2002). Para tal, foram pesados 40 g de terra fina seca ao ar e colocados em frascos de 500 mL. Posteriormente foram adicionados 250 mL de água destilada e 100 mL de solução dispersante contendo 10 g L^{-1} de hexametáfosfato de sódio e 4 g L^{-1} de NaOH. Os frascos eram fechados hermeticamente e colocados em agitação horizontal por 17 horas. Transcorrido o tempo de agitação, o conteúdo de cada frasco era colocado em provetas e completado até 1,0 L com água destilada. Nesse ato, era utilizada uma peneira de 50 μm para separar a areia, a qual era colocada em latas para secagem em estufa a 105°C por 24 horas. Desta forma foi obtido o conteúdo de areia na amostra.

Posteriormente, as provetas eram colocadas em aquário contendo água por 3 horas com o objetivo de estabilizar a temperatura da suspensão com a do ambiente. Transcorrido esse tempo, com um bastão agitava-se a suspensão por um minuto. A partir desse momento, era contabilizado o tempo necessário para que o silte ultrapasse 10 cm de profundidade, tempo que foi calculado a partir da lei de Stokes. Nesse exato momento, tomava-se uma alíquota de 25 mL de suspensão utilizando pipeta automática calibrada para que a extração durasse 12 segundos. Os 25 mL de suspensão eram colocados em beakers e secos em estufa até peso constante. Dessa forma foi quantificado o conteúdo de argila nas amostras. O conteúdo de silte foi calculado por diferença para totalizar 100%. Como fora mencionado, os procedimentos relatados podem ser encontrados em Gee e Or (2002).

Para quantificar a quantidade de argila dispersa em água, utilizou-se o mesmo procedimento mas sem adicionar dispersante químico.

O conteúdo de carbono orgânico foi obtido pela oxidação da matéria orgânica do solo a CO_2 por íons dicromato em meio fortemente ácido, utilizando o procedimento Walkeley-Black modificado, descrito em Cantarella, Quaggio e Raij (2001). A reação de oxidação da matéria orgânica é amostrada abaixo:

Nessa reação, pelo método citado, considerou-se o dicromato reduzido equivalente ao carbono orgânico existente na amostra de solo. O excesso de dicromato foi titulado com íons Fe^{2+} obtidos a partir de uma solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal isto é,

Na determinação por titulação, a quantidade de carbono orgânico foi obtida pela diferença entre a quantidade de Fe^{2+} gasta na titulação de uma prova em branco e outra gasta na titulação do dicromato que restou depois da oxidação do carbono da amostra. Os valores de porcentagem de carbono orgânico foram convertidos a conteúdo de matéria orgânica assumindo um fator constante de conversão de 1,724 com base no pressuposto de que a matéria orgânica contém 58% de C orgânico.

Procedeu-se da seguinte maneira. Um grama de terra fina seca ao ar foi transferido para um erlenmeyer de 500 mL. Adicionaram-se 10 mL da solução de dicromato de potássio ($0,167 \text{ mol L}^{-1}$) e agitou-se por alguns segundos. Posteriormente adicionaram-se 20 mL de H_2SO_4 concentrado p.a. agitando-se por alguns segundos. Deixou-se a mistura resfriando em repouso por uma hora e depois adicionaram-se 200 mL de água destilada. Para realizar a titulação, acrescentaram-se 10 mL de ácido fosfórico, H_3PO_4 p.a., mais 3 gotas do indicador difenilamina (10 g L^{-1}). Logo depois procedeu-se a titulação com sulfato ferroso amoniacal ($0,4 \text{ mol L}^{-1}$) até viragem de azul para verde. Como requerido pelo método, paralelamente se fez uma prova em branco para determinar a concentração exata de solução de sulfato ferroso amoniacal. O procedimento detalhado encontra-se em Cantarella, Quaggio e Raij (2001).

2.2.3.6 Ponto de efeito salino nulo e Potencial elétrico superficial

A determinação do ponto de efeito salino nulo (PESN) (ALLEONI; CAMARGO, 1993; CAMARGO; ALLEONI, 1996) baseia-se na titulação potenciométrica de amostras de solo com H^+ e OH^- em distintas concentrações de eletrólito (RAIJ; PEECH, 1972). Para um dado valor de pH, há uma situação em que a adsorção de H^+ e OH^- é a mesma e, portanto, a carga líquida nesse pH é zero e não depende da concentração salina, ou seja, o efeito salino sobre a adsorção de H^+ e OH^- é nulo.

As amostras de solo usadas para a determinação do ponto de efeito salino nulo foram oriundas das camadas de 0 - 0,15 e de 0,95 - 1,05 m de profundidade. O eletrólito usado para a titulação potenciométrica foi KCl nas concentrações 0,1 mol L⁻¹, 0,01 mol L⁻¹ e 0,001 mol L⁻¹. Para cada concentração de KCl foram adicionadas soluções contendo diferentes concentrações de NaOH (0,002 e 0,004 mol L⁻¹) ou HCl (0,002, 0,004 e 0,008 mol L⁻¹). Para tal, foram colocados 4 g de terra fina seca em estufa em recipiente para determinação do pH e 20 mL em cada uma das soluções de KCl e ácido ou base mencionadas, ou seja, para cada amostra de solo havia as seguintes soluções: concentração de KCl + 0,002 mol L⁻¹ de HCl; concentração de KCl + 0,004 mol L⁻¹ de HCl; concentração de KCl + 0,008 mol L⁻¹ de HCl; apenas concentração de KCl (sem adição de solução de ácido ou base); concentração de KCl + 0,002 mol L⁻¹ de NaOH e concentração de KCl + 0,004 mol L⁻¹ de NaOH. Essas concentrações correspondem a 10, 20, 30 e 0 mmol de H^+ por kg de terra e 10 e 20 mmol de OH^- por kg de terra, respectivamente. É importante salientar que essas concentrações permitem a obtenção de um pH na faixa de 3,0 a 8,0, na qual está inserido o PESN para a maioria dos solos de que se tem conhecimento.

Deixou-se equilibrar por 24 horas agitando a cada hora por 15 minutos, sendo a última agitação 30 minutos antes da leitura do pH.

Decorridas as 24 horas, fez-se a leitura do pH em peagâmetro digital. Para agilizar o processo de leituras, iniciou-se pela concentração ácida mais diluída (KCl 0,001 mol L⁻¹), na maior dose de HCl (0,008 mol L⁻¹), em que são esperados os menores valores de pH. Na sequência, o pH foi medido na concentração intermediária de KCl (0,01 mol L⁻¹), também na maior concentração de HCl e, por último, na maior concentração de KCl também na maior concentração de HCl. Vale destacar que essa sequência apenas agiliza o processo de leitura devido ao equilíbrio eletrodo-solução acontecer mais rapidamente. Outro ponto a ser destacado é

que entre cada leitura seja feita a lavagem do eletrodo com água destilada para a retirada de resíduos da amostra anterior.

Finalmente, foi construído um gráfico colocando na abscissa a quantidade de H^+ ou OH^- adsorvido em $mmol\ kg^{-1}$ de terra e na ordenada o pH de equilíbrio. O ponto de efeito salino nulo foi considerado como sendo o pH no qual ocorre a interseção de curvas de titulação potenciométrica. Para dirimir possíveis dúvidas ao respeito do ponto de interseção foi utilizado programa PESN para Windows, versão 1.0 que estima, a partir das leituras de pH para as distintas concentrações eletrolíticas, o PESN (ALVES; MACEDONIO; LAVORENTI, 2001).

O valor de potencial elétrico foi calculado pela equação simplificada de Nerst citada em Fontes; Camargo e Sposito (2001), $\Psi_o = 59,1(PESN - pH)$, sendo Ψ_o , potencial elétrico em mV ao valor de pH em água atual do solo e o PESN, o ponto de efeito salino nulo.

2.2.4 Componentes do balanço hídrico

Os componentes do balanço hídrico no solo cultivado com cana-de-açúcar são os processos que compoem os termos da equação do balanço, isto é,

$$P + I - D + AC - ET_r \pm R \pm \Delta H_z = 0, \quad (4)$$

sendo P, precipitação pluvial; I, irrigação; D, drenagem interna; AC, ascensão capilar; ET_r , evapotranspiração real da cultura; R, deflúvio superficial e ΔH_z , a variação de armazenagem de água no solo até $z = 0,9$ m de profundidade. A área experimental foi manejada em sistema de sequeiro e apresenta declividade predominante entre 2 e 4% (em Anexo A ver Figura 35 e Figura 36), razão pela qual os componentes I e R foram considerados iguais a zero. A descrição detalhada dos componentes do balanço hídrico pode encontrar-se em Reichardt e Timm (2004) e Libardi (2005).

2.2.4.1 Precipitação (P)

Dados de precipitação diária foram obtidos em pluviômetro instalado no local do experimento (Figura 3 e Anexo A: Figura 35) e comparados com a série histórica de precipitações de Jaboticabal, compreendida entre 1936 e 2004, obtida do SIGRH (2007).

2.2.4.2 Armazenagem de água no solo (H)

A armazenagem de água no solo (H) foi determinada pelo método gravimétrico, em cada uma das repetições, no mesmo período em que foram feitas as leituras de tensiômetros, a cada 20 dias aproximadamente. Coletaram-se amostras deformadas de solo nas camadas: 0 – 0,15; 0,15 – 0,25; 0,25 – 0,35; 0,35 – 0,45; 0,45 – 0,55; 0,55 – 0,65; 0,65 – 0,75; 0,75 – 0,85; 0,85 – 0,95 e 0,95 – 1,05 m utilizando trado tipo Holandês (Figura 7). Cada amostra foi colocada em um recipiente de alumínio e fechada hermeticamente para evitar perdas de água. Já no laboratório, foram determinadas as massas do solo úmido e do solo seco em estufa a 105°C durante 48 horas (GARDNER, 1986). Posteriormente foram calculados os conteúdos de água gravimétrico (U) e volumétrico (θ) e, então, a armazenagem (H). A armazenagem de água em cada período foi calculada pela regra do trapézio e a variação da armazenagem no perfil (ΔH) pela diferença de água contida entre datas consecutivas de amostragem (LIBARDI, 2005; REICHARDT; TIMM, 2004).

Para evitar alterações nas parcelas, as amostras foram retiradas a 0,3 m ao lado das linhas de plantio adjacentes e paralelas à linha de plantio da cana-de-açúcar onde se encontravam o conjunto de tensiômetros e o extrator de solução de solo (Figura 3). Depois de retiradas as amostras, o buraco deixado pelo trado, de aproximadamente 0,15 m de diâmetro era imediatamente preenchido com terra.

2.2.4.3 Drenagem interna (D) e Ascensão capilar (AC)

O fluxo de água no solo na profundidade de controle (D ou AC) foi estimado por meio da equação de Darcy-Buckingham:

$$q_{z=0,9} = -K(\theta) [\Delta(\psi_t) / L]. \quad (5)$$

Na eq. (5), q_z é o fluxo da água no solo ($m\ d^{-1}$) a 0,9 m de profundidade; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo para o conteúdo volumétrico de água θ a 0,9 m de profundidade ($m\ d^{-1}$) e $\Delta\psi_t/L$ é o gradiente de potencial total da água no solo. A profundidade de controle de 0,9 m foi escolhida porque a maior proporção de raízes ativas de cana-de-açúcar encontra-se até esta

profundidade, de fato, 80 % destas raízes estão nos primeiros 0,6 m de profundidade (BALL-COELHO et al., 1992; SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Para a determinação diária de $K(\theta)$ e $\Delta\psi_t/L$ foram instalados tensiômetros nas profundidades: 0,8; 0,9 e 1,0 m em cada uma das parcelas dos diferentes tratamentos, totalizando 36 instrumentos (Figura 8). Os equipamentos foram instalados em parcelas de cada tratamento em cotas semelhantes no relevo como pode observar-se no mapa de relevo no Anexo A, com exceção das posições 9 e 10. Na instalação dos tensiômetros utilizou-se um trado de rosca com diâmetro igual ao da cápsula porosa com o qual abriu-se um orifício até a profundidade desejada. Com o mesmo solo extraído com o trado, preparou-se uma pasta a qual foi aplicada no orifício no momento de colocar o tensiômetro de modo a assegurar o contato da cápsula com o solo. Para evitar fluxo preferencial de água pelas paredes do tensiômetro, colocou-se um manchão de borracha na superfície do solo circundando o tensiômetro.

Com os tensiômetros instalados a 0,8 e 1,0 m de profundidade determinou-se o gradiente de potencial total da água no solo ($\Delta\psi_t/L$) calculado como $(\psi_t^{(0,8)} - \psi_t^{(1)})/0,2$, sendo $\psi_t^{(0,8)}$ e $\psi_t^{(1)}$ os potenciais totais da água no solo a 0,8 e 1,0 m de profundidade e 0,2 m corresponde à distância que separa os tensiômetros, L. A leitura do tensiômetro instalado a 0,9 m de profundidade foi convertida em conteúdo volumétrico de água utilizando a curva de retenção, e com esse valor se calculava a condutividade hidráulica pela equação obtida pelo método do perfil instantâneo (item 2.2.3.2.3, eq. 2). A frequência de leitura dos tensiômetros foi diária, desde 23/10/2006 até 9/7/2007 (260 dias) entre as 7h 30min e 8h da manhã, o que permitiu relacionar o fluxo com as precipitações diárias no local do experimento. Semanalmente os tensiômetros eram preenchidos com água para assegurar o correto funcionamento.

2.2.4.4 Evapotranspiração da cultura (ET_r)

Com o intuito de calcular a evapotranspiração da cultura, escolheu-se uma área experimental com declividade baixa de modo de poder considerar a não existência de deflúvio superficial nem sub-superficial (Anexo A). Fazendo-se essa simplificação, foi calculada a evapotranspiração real da cultura com a eq. 4, utilizando a informação gerada por P, ΔH , D e AC e deixando ET_r como incógnita. O cálculo da evapotranspiração real foi feito entre datas de

amostragem do perfil de umidade. Dividindo a ET_r pelo número de dias de cada período calculou-se a evapotranspiração real diária.

2.2.5 Concentração de íons na solução do solo

2.2.5.1 Coleta de amostras

A determinação da lixiviação na profundidade de 0,9 m, precisa de medições periódicas da concentração dos íons na solução do solo. Para tal, amostras de solução do solo foram coletadas utilizando-se extratores de solução com cápsula porosa (Figura 8). Os extratores foram instalados na profundidade de 0,9 m em cada parcela experimental, totalizando 12 extratores de solução (Figura 3). A instalação realizou-se com o mesmo procedimento utilizado para instalar os tensiômetros.

Para extrair a solução do solo fazia-se vácuo no extrator da ordem de 500 mm_{Hg} por meio de uma bomba manual e, deixava-se por 1 dia o equipamento sob tensão succionando a solução do solo. Posteriormente, interrompia-se o vácuo e a solução coletada passava para o recipiente de vidro. A solução era armazenada em recipientes de plástico convenientemente rotulados. Depois da coleta, as amostras de solução eram levadas para o laboratório, congeladas para evitar alterações e, então, encaminhadas para análise da concentração dos diferentes íons.

No total foram coletadas 579 amostras: 68 no extrator 1, 35 no extrator 2, 59 no extrator 3, 67 no extrator 4, 37 no extrator 5, 34 no extrator 6, 36 no extrator 7, 53 no extrator 8, 39 no extrator 9, 25 no extrator 10, 65 no extrator 11, 61 no extrator 12.

2.2.5.2 Determinação da concentração de íons da solução extraída do solo

No dia anterior à determinação, as amostras a serem analisadas eram descongeladas e esperavam-se 12 horas para que a temperatura de cada amostra se equilibrasse com a do ambiente. Posteriormente, a solução retirada do solo era filtrada manualmente a vácuo utilizando filtros millipore de celulosa 0,45 μ m visando eliminar particulados em suspensão. Após a filtração foram determinadas as concentrações de cátions (NH_4^+ ; Ca^{2+} ; Na^+ ; K^+ ; Mg^{2+}) e de ânions (NO_3^- ; NO_2^- ; SO_4^{2-} ; PO_4^{3-} ; Cl^- ; F^-) por cromatografia iônica (TABATABAI; BASTA, 1991) utilizando o equipamento Dionex ICS-90. A identificação e quantificação dos diferentes

íons presentes nas amostras foram feitas pela comparação com resultados obtidos das curvas dos padrões previamente definidas (FERNANDES, 2008).

Nas amostras que apresentavam pH superior a 5 determinou-se o teor alcalino, tendo em vista que abaixo desses valores de pH o carbono inorgânico dissolvido encontra-se na forma de CO_2 (STUMM; MORGAN, 1981 apud FERNANDES, 2008). Para determinar o teor de alcalinidade, que representa o HCO_3^- , foi utilizada a microtitulação de Gran (EDMOND, 1970 apud FERNANDES, 2008), em que 25 mL de cada amostra são tituladas com baixos volumes de HCl 0,1 N. As análises de concentração dos diferentes íons foram realizadas por pessoal do laboratório de isótopos estáveis do CENA/USP e o procedimento detalhado encontra-se descrito em Fernandes (2008).

Figura 7 - Amostragem de solo para determinação da armazenagem de água pelo método gravimétrico.

Figura 8 – Tensiômetros e extratores de solução instalados no campo

2.2.5.3 Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{15}N

Depois de realizadas as análises de cromatografia de íons, utilizaram-se as amostras para determinar a abundância isotópica de ^{15}N ($n=211$ amostras) correspondendo: 36 ao extrator 2, 63 ao extrator 4, 48 ao extrator 8 e 64 ao extrator 11. Como o teor de nitrogênio da solução no solo para determinar ^{15}N por espectrometria de massas foi baixo, o N foi concentrado utilizando o método da difusão (SORENSEN; JENSEN, 1991), procedendo-se da maneira relatada a seguir.

As análises foram realizadas em grupos de 25 amostras ordenadas por extrator de forma cronológica, considerando a data de extração no campo. Previamente, utilizando a concentração de N obtida por cromatografia e o volume disponível de cada amostra, estimou-se o conteúdo de nitrogênio total. Em recipientes de plástico, adicionou-se um volume de amostra contendo aproximadamente 100 µg de N (que garantiria uma análise confiável no espectrômetro de massas) e água deionizada até atingir 50 mL. Filtros de fibra de vidro (Whatman GF/A 47mm) foram cortados em círculos de 10 mm de diâmetro e colocados sobre fita de politetrafluoretileno (PTFE) de 7 cm x 18 mm que não continha N na sua constituição. O filtro era acidificado pela adição com micropipeta de 10 µL de sulfato ácido de potássio (KHSO₄) 2,5 M. Finalmente o filtro foi envolvido com a fita de PTFE, a qual era dobrada ao meio e vedada em suas bordas para impedir a entrada da solução depois de submersas na solução do solo. Em cada bateria foram feitos 5 brancos contendo 50 mL de água deionizada, sem solução do solo.

Na sequência, a fita com o filtro acidificado era colocada no recipiente contendo a solução e eram adicionados, com cachimbo, aproximadamente 450 mg de liga de Devarda (Cu (50%), Al (45%) e Zn (5%)) para reduzir o NO₃⁻ e o NO₂⁻ a NH₄⁺ e, 200 mg de MgO calcinado, para alcalinizar o meio e converter o NH₄⁺ em NH₃. Cada recipiente era vedado e rapidamente fechado para evitar perdas de N. Posteriormente, procedeu-se a agitação por 48 horas a, aproximadamente 25°C, com agitador circular (100 rpm) em um ambiente escuro artificial para evitar o desenvolvimento de algas, as quais poderiam consumir o N. Durante essa etapa, toda amônia formada se difundia através da membrana de PTFE, impermeável à água e permeável a NH₃, ficando retida no filtro. Após as 48 horas no agitador, as fitas foram removidas dos recipientes e colocadas em dissecador por 48 horas em ambiente livre de amônia no ar até garantir ausência de umidade. As reações abaixo sintetizam o processo:

Depois da etapa de secagem, os filtros eram retirados da fita de PTFE pesados em balança de precisão e colocados em cápsulas de estanho (6 x 12 mm) para determinação da abundância isotópica em espectrômetro de massas (ANCA GSL, modelo Hydra 20/20). O ¹⁵N real de cada amostra foi calculado subtraindo o N do branco do total de N contido em cada filtro (eq. 6):

$$^{15}\text{N} = \left[\left(^{15}\text{N}_{\text{amostra}} \times \text{N}_{\text{amostra}} \right) - \left(^{15}\text{N}_{\text{branco}} \times \text{N}_{\text{branco}} \right) \right] / \left(\text{N}_{\text{amostra}} \times \text{N}_{\text{branco}} \right)$$

sendo: ^{15}N , o conteúdo real do isótopo ^{15}N na amostra; $^{15}\text{N}_{\text{amostra}}$, o conteúdo medido do isótopo ^{15}N na amostra; $\text{N}_{\text{amostra}}$, o conteúdo de N total na amostra; $^{15}\text{N}_{\text{branco}}$, o conteúdo medido do isótopo ^{15}N no branco e, N_{branco} , o conteúdo de N total no branco.

Foi essencial no processo de recuperação de N nos filtros, evitar contaminação cruzada fazendo-se o processo em ambiente livre de amônia e, cuidar que os filtros não ficassem grudados na parede do recipiente contendo a solução o que diminuiria a eficiência no recuperação da amônia.

Utilizando abundância de ^{15}N e com o intuito de quantificar o N lixiviado proveniente do fertilizante, a porcentagem de nitrogênio da solução no solo proveniente do fertilizante (%NSSPF) foi calculada pela eq. (7):

$$\% \text{NSSPF} = \left(\% \text{At}_{\text{solução}} - \% \text{At}_{\text{solo}} \right) / \left(\% \text{At}_{\text{fertilizante}} - \% \text{At}_{\text{solo}} \right) \quad (7)$$

sendo %At as abundâncias de ^{15}N da solução no solo, do fertilizante (2,15%) e natural do solo (0,367%).

2.2.5.4 Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{34}S

Depois de determinado o conteúdo de ^{15}N , fizeram-se as análises de ^{34}S utilizando o volume de solução restante de cada amostra. Como o conteúdo necessário de enxofre na amostra para obter resultados confiáveis de abundância de ^{34}S no espectrômetro de massas deve ser superior a 500 μg de enxofre, juntaram-se em beckers, amostras coletadas em cada extrator de forma cronológica até de atingir a quantidade de S desejada ou superior. Para isso, antes da junção, calculou-se a quantidade de enxofre por amostra a partir da concentração de S e do volume disponível de cada uma delas. Obtiveram-se finalmente, 3 amostras no extrator 2, 5 amostras no extrator 4, 1 amostra no extrator 8 e 2 amostras no extrator 11, contendo entre 80 e 1700 mL de solução cada uma com a concentração de S desejada.

Posteriormente, cada Becker foi colocado em estufa a 65°C com a finalidade de concentrar a solução até um volume de aproximadamente 60 mL. Atingido esse volume, as

amostras eram retiradas da estufa e transferidas para frascos de vidro, cuidando de lavar bem as paredes dos beakers para evitar perdas de S.

O extrato contendo o S total foi acidificado a um valor de pH entre 2 e 3 utilizando-se HCl (6 M) procedendo-se posteriormente ao aquecimento das amostras em prancha de aquecimento a 60°C. Logo depois de aquecidas, fez-se precipitar o SO_4^{2-} pela adição de 10 mL de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10 % (m/V) segundo a reação:

sendo que liq e s indicam os estados líquido e sólido, respectivamente.

As amostras ficaram em repouso por 24 horas para favorecer a formação do precipitado e, posteriormente, procedeu-se à lavagem do sobrenadante utilizando um extrator com bomba de vácuo. No total fizeram-se 3 lavagens espaçadas 24 horas, adicionando entre cada lavagem 60 mL de água deionizada. Depois da última lavagem, colocaram-se as amostras em estufa a 65°C até evaporar-se completamente o sobrenadante, durando o processo aproximadamente 24 horas. Uma vez secas, fez-se uma raspagem com espátula do fundo de cada frasco para remover o precipitado, que era posteriormente colocado sobre papel alumínio e pesado. Obtiveram-se entre 5 e 20 mg de BaSO_4 por amostra às quais adicionou-se metafosfato de sódio (NaPO_3) na razão 1:3 m/m ($\text{BaSO}_4:\text{NaPO}_3$). O $\text{NaPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ era previamente colocado em estufa, 2 horas a 200°C, com a finalidade de remover a água estrutural do composto e eliminar possíveis impurezas orgânicas obtendo-se NaPO_3 .

A mistura de BaSO_4 e NaPO_3 foi colocada em tubo de quartzo (TQ) de 30 cm de comprimento, adicionando-se uma tampa de lã de rocha de 1,5 cm, 2,5 cm de cobre metálico (Cu^0) e outra tampa de lã de rocha de 1,5 cm (Figura 10a). A lã de rocha foi utilizada para dar sustentação à mistura. Na sequência, o tubo de quartzo era conectado na linha de alto vácuo e era abastecida armadilha A_1 com nitrogênio líquido (-196°C) (Figura 10b). A seguir, o sistema era despressurizado primeiramente com uma bomba mecânica da ordem de 10^{-2} mbar e, posteriormente, com uma bomba difusora (BD) da ordem de 10^{-3} mbar, com o objetivo de eliminar vapor de água e diminuir a interferência do oxigênio.

Na sequência havia as armadilhas A_2 com uma mistura de gelo seco e etanol (-73°C) que permite reter por congelamento o vapor de água ainda existente no sistema e, a armadilha A_3

contendo nitrogênio líquido (-196°C) que permite reter o vapor de SO_2 (Figura 10c). A seguir se deslocava o forno elétrico (FE) para o TQ aquecido a 900°C a fim de produzir SO_2 mediante combustão da amostra e, por decomposição térmica converter, o sulfato de bário a dióxido de enxofre (BAILEY; SMITH, 1972; YANAGISAWA; SAKAL, 1983):

Pode ser observado nas reações que o Cu^0 tem a finalidade de reter os óxidos formados na combustão e converter todo o SO_3 em SO_2 . A metodologia assegura que o SO_2 é o suficientemente puro para ser analisado diretamente no espectrômetro de massas.

O SO_2 retido na armadilha A_3 era transferido ao recipiente ST retirando o recipiente contendo N líquido e aquecendo a parte da linha de alto vácuo que contem o gás. Posteriormente o recipiente contendo o SO_2 era conectado ao sistema de admissão do espectrômetro de massas. A determinação de abundância isotópica de ^{34}S de cada amostra foi realizada no espectrômetro de massas modelo ATLAS-MAT CH-4.

Utilizando abundância de ^{34}S e com o intuito de quantificar o S lixiviado proveniente do fertilizante, a porcentagem de enxofre da solução no solo proveniente do fertilizante (%SSSPF) foi calculada pela eq. (7), sendo %At as abundâncias de ^{34}S da solução no solo, do fertilizante (10,5%) e do solo (4,28%).

Figura 9 - Preparo de amostras para determinação da abundância de ^{15}N . (a) Acidificação do filtro com sulfato ácido de potássio; (b) e (c) filtro envolvido com a fita de PTFE; (d) fita com o filtro acidificado colocada no recipiente contendo liga de Devarda e MgO ; (e) depois de agitação por 48 horas os filtros eram colocados em dessecador por 48 horas para posteriormente ser analisadas no espectrômetro de massa.

Figura 10 - Preparo de amostras e determinação da abundância de ^{34}S . (a) Tubo de quartzo; (b) sistema de alto vácuo para obtenção do SO_2 que seria logo analisado no espectrômetro de massas e, (c) SO_2 retido na armadilha A_3 antes de ser transferido ao recipiente ST

2.2.6 Lixiviação de macronutrientes

O movimento de íons foi quantificado integrando o fluxo diário de íons no tempo como indicado na equação:

$$q_{\text{NO}_3^-} = \int_{t_0}^{t_f} q C_{\text{NO}_3^-} dt \quad (8)$$

para o ânion NO_3^- , sendo q_{NO_3} ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) a densidade de fluxo de nitrato no solo, q a densidade de fluxo de água no solo (m d^{-1}) e C_{NO_3} a concentração de nitrato da solução no solo (kg L^{-1}) no momento da medição. t_0 e t_f representam o tempo inicial (primeira leitura depois da instalação

dos equipamentos em 16/11/2006) e final (colheita da cana-de-açúcar em 9/7/2007). Para estimar a densidade de fluxo dos outros íons avaliados utilizou-se o mesmo procedimento. A Figura 11 apresenta um diagrama do procedimento utilizado. Para determinar a quantidade do N e S proveniente do fertilizante lixiviados, se utilizou a eq. 8 multiplicando-se a concentração total pela abundância de ^{15}N e ^{34}S , obtidas como relatado no item 2.2.5.3 e 2.2.5.4.

Figura 11 - Diagrama simplificado do método utilizado para quantificar a o fluxo de água e nitrogênio. Mesmo procedimento foi utilizado para os outros íons

2.2.7 Análise estatística

Em cada tratamento e para cada período avaliado, calculou-se a média e o desvio-padrão das quatro repetições dos componentes do balanço hídrico e da quantidade dos diferentes íons lixiviados. Posteriormente, foi utilizada a teoria de propagação dos erros (HENNIES; GUIMARÃES; ROVERSI, 1986; ALLMARAS; KEMPTHORNE, 2002), fazendo-se a raiz quadrada do somatório das variâncias de cada período, para assim obter o desvio-padrão propagado. O procedimento de cálculo é exemplificado, para o componente drenagem (D), na equação a seguir:

$$s(D) = \sqrt{s_{(1)}^2 + s_{(2)}^2 + \dots + s_{(10)}^2 + s_{(11)}^2} \quad (9)$$

sendo, $s(D)$, o desvio-padrão propagado da drenagem interna, desde o período $p = 1$ até $p = 11$ e, s_n^2 , a variância da componente drenagem para as $n = 4$ repetições em cada período. A proporção em que o erro afetou a medida foi calculada dividindo o erro absoluto pelo valor da grandeza (neste caso o total drenado no ciclo) e expresso logo em porcentagem.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso totalizando quatro blocos com três tratamentos e uma repetição por bloco. A comparação realizou-se por períodos utilizando-se o teste F da análise da variância. A comparação das médias de cada período e do total para a armazenagem (H), variação de armazenagem (ΔH), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC), evapotranspiração real (ET_r), evapotranspiração real diária (ET_r/dia) e fluxo de íons foi feita por meio do teste LSD (“least significant difference” – diferença menos significativa), utilizando o programa estatístico SAS, “Statistical Analysis System Institute” (SAS, 1991).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Atributos físicos e físicoquímicos do solo

2.3.1.1 Granulometria, matéria orgânica e atributos eletroquímicos.

A Tabela 3 mostra que o solo é franco-argilo-arenoso, com um incremento na porcentagem de argila e diminuição na areia a partir de 0,35 m de profundidade e, conteúdo de silte baixo em todo o perfil do solo. A relação silte/argila inferior a 0,7 e a atividade da fração argila baixa (inferior a 27 cmol_c kg⁻¹ de argila, calculada como CTC*1000/g kg⁻¹ de argila) indicaram alto grau de intemperismo do solo (EMBRAPA, 2006). Pode-se observar também que os coeficientes de variação tiveram valores similares aos normalmente encontrados na literatura (WARRICK; NIELSEN, 1980; KUTILEK; NIELSEN, 1994).

Observa-se na Tabela 3, que a quantidade de argila dispersa em água (ADA) diminuiu em profundidade. A partir de 0,55 m o grau de floculação foi quase de 100%, provavelmente porque o pH_{H2O} esteve mais próximo do ponto de efeito salino nulo (PESN) que na superfície e o ΔpH perto de zero (Tabela 1, Tabela 4). Interpretação semelhante foi dada por Alleoni e Camargo (1994a) quando associaram o elevado grau de floculação com valores de densidade de carga

elétrica superficial, potencial elétrico superficial e ΔpH próximos da neutralidade no horizonte B de Latossolos ácidos.

Tabela 3 - Granulometria, argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF) e matéria orgânica (MO) nas diferentes camadas do perfil de solo

Camada (m)	Argila	Areia	Silte	ADA	GF	MO
		(g kg ⁻¹)		(%)	(%)	(g kg ⁻¹)
0,00 – 0,15	304,0 (4,6)	652,1 (2,0)	44,0 (24,2)	21,8 (7,7)	28,4	14,70 (11,6)
0,15 – 0,25	308,1 (6,0)	648,2 (2,5)	43,7 (16,0)	21,6 (11,3)	29,8	13,03 (12,8)
0,25 – 0,35	345,9 (8,4)	615,0 (4,8)	39,1 (25,0)	18,1 (37,0)	47,6	11,66 (13,8)
0,35 – 0,45	382,0 (4,2)	577,6 (3,4)	40,4 (23,2)	14,0 (81,5)	63,5	10,41 (19,2)
0,45 – 0,55	378,9 (3,8)	576,7 (2,1)	44,4 (15,3)	8,3 (142,2)	78,2	9,60 (17,5)
0,55 – 0,65	380,7 (4,2)	576,9 (2,5)	42,4 (12,2)	0,5 (85,4)	98,6	8,59 (22,1)
0,65 – 0,75	384,0 (3,2)	574,9 (2,0)	41,1 (17,3)	0,2 (62,9)	99,6	7,61 (15,4)
0,75 – 0,85	385,0 (2,9)	574,1 (2,1)	40,9 (19,2)	0,3 (29,9)	99,2	7,35 (26,1)
0,85 – 0,95	382,8 (2,5)	575,9 (1,8)	41,3 (7,7)	0,4 (16,4)	99,0	6,99 (23,4)
0,95 – 1,05	378,1 (2,7)	578,8 (2,2)	43,1 (12,5)	0,1 (54,5)	99,7	7,14 (23,8)

GF= [(%Argila-%ADA)/%Argila]*100. Valores entre parênteses são os coeficientes de variação de cada determinação (n=13 por camada).

Pelos valores de ΔpH menores que zero, nota-se um predomínio de carga negativa quando considerada a hipótese de Mekaru e Uehara (1972), na qual o ΔpH deve indicar a carga líquida do solo. Verificou-se, também, que o pH_{H_2O} do solo foi superior ao PESN, indicando predomínio das cargas negativas sobre as positivas favorecendo-se a retenção de cátions (Tabela 1, Tabela 4). Nas camadas avaliadas não se observou inversão de cargas devido a que o pH_{H_2O} foi sempre superior ao PESN. Inversão de carga líquida negativa para positiva entre os horizontes A e B foi observada por Alleoni e Camargo (1994b), fenômeno associado à maior retenção de ânions (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Como a caulinita possui um valor de PESN perto de 3,0 (TSCHAPEK et al., 1974 apud ALLEONI; CAMARGO, 1994b), os resultados indicaram que possivelmente seja o argilomineral predominante no solo. A afirmativa é também suportada pelo valor dos índices k_i e k_r , sempre superiores a 0,75 indicando predominância de minerais do grupo da caulinita (Tabela 2) (EMBRAPA, 2006). O maior potencial negativo no horizonte superficial pode ser explicado pela presença de maior quantidade de matéria orgânica (Tabela 3) e pela menor quantidade de óxidos de Fe e Al em superfície (Tabela 2). O aumento do PESN em profundidade esteve provavelmente relacionado com uma maior participação de óxidos de Fe e Al na geração de

cargas positivas, já que seu PESN é elevado, entre 8 e 10 (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Tabela 4 – Pontos de efeito salino nulo (PESN) e potencial elétrico superficial (ψ_o) no pH atual de campo

Camada (m)	pH	pH _{KCl}	Δ pH	PESN	ψ_o (mV)
0 – 0,15	5,70	5,15	-0,55	3,31	-141
0,95 – 1,05	5,22	4,99	-0,23	3,76	-86

Amostragem efetuada no ciclo agrícola de cana-soca em 20/4/07.

2.3.1.2 Densidade do solo, densidade dos sólidos e porosidade total

A Tabela 5 mostra os dados de densidade do solo (ρ) para as diferentes camadas do perfil do solo. Os coeficientes de variação estão dentro do intervalo apresentado para essa propriedade com o método de determinação utilizado (JURY; FLÜHLER, 1992). As maiores densidades se registraram nas camadas superficiais até 0,35 m, coincidindo com os maiores conteúdos de areia e com a zona de maior influencia do tráfego de máquinas. A partir de 0,55 m em profundidade a ρ é menor que nas camadas superficiais coincidindo com o maior conteúdo de argila e com o aumento do grau de floculação (Tabela 3). A densidade dos sólidos foi determinada por Brito (2006) utilizando picnômetro de gás e foi utilizada para calcular a porosidade total do solo (PT).

Tabela 5 – Densidade do solo (ρ) e densidade dos sólidos do solo (ρ_s), porosidade total calculada (PT) e macroporosidade (Ma) nas diferentes camadas do perfil do solo

Camada (m)	ρ (Mg m ⁻³)	ρ_s (Mg m ⁻³)	PT (m ³ m ⁻³)	Ma (m ³ m ⁻³)
0,00 – 0,15	1,530 (7,6)	2,672	0,427	0,099
0,15 – 0,25	1,577 (5,1)	2,672	0,410	0,079
0,25 – 0,35	1,594 (5,0)	2,679	0,405	0,065
0,35 – 0,45	1,496 (3,9)	2,686	0,443	0,080
0,45 – 0,55	1,462 (3,4)	2,690	0,457	0,107
0,55 – 0,65	1,416 (5,7)	2,694	0,474	0,104
0,65 – 0,75	1,425 (3,6)	2,698	0,472	0,108
0,75 – 0,85	1,405 (5,3)	2,697	0,479	0,114
0,85 – 0,95	1,415 (3,7)	2,700	0,476	0,101
0,95 – 1,05	1,400 (4,7)	2,699	0,481	0,119

Valores entre parênteses são os coeficientes de variação de cada determinação (n= 13 por camada). Porosidade total calculada: PT= $1-\rho/\rho_s$; Macroporosidade (Ma): porosidade de raio equivalente maior a 37,5 μ m calculada utilizando a curva de retenção a $\tau= 40$ cm_{H₂O} (KAY; ANGERS, 2000).

2.3.1.3 Curvas de retenção de água no solo

A Tabela 6 mostra os resultados dos ajustes das curvas de retenção de cada camada do solo em estudo. Na Figura 12 são apresentadas as curvas de retenção (CR) para os dados experimentais obtidos. Observando as CR das diferentes camadas do solo, pode-se inferir a falta de homogeneidade no sentido vertical do perfil do solo. Esta afirmativa é importante porque em não sendo homogênea a CR do solo, também não serão homogêneas as propriedades hidráulicas mais intimamente relacionadas com o transporte de solutos. Destaca-se também, o fato de o solo apresentar uma distribuição de poros unimodal, e que, especialmente em profundidade, a forma das curvas é de um S invertido, mostrando que os poros maiores são esvaziados rapidamente (HILLEL, 2004), comportamento típico de solos arenosos de elevada condutividade hidráulica.

Tabela 6 – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção para cada camada do perfil do solo

							(continua)
Camada (m)	Parâmetro	Valor	Desv.padrão	Valor t	Intervalo de confiança		r ²
					95%		
					Inferior	Superior	
0,00 – 0,15	θ_r	0,17080	0,00720	23,72	0,1548	0,1868	0,9833
	θ_s	0,40505	0,01079	37,54	0,3810	0,4291	
	α	0,03657	0,00705	5,19	0,0209	0,0523	
	n	1,95380	0,19347	10,10	1,5227	2,3849	
0,15 – 0,25	θ_r	0,17822	0,00518	34,38	0,1667	0,1898	0,9875
	θ_s	0,38697	0,00804	48,12	0,3690	0,4049	
	α	0,02869	0,00393	7,30	0,0199	0,0374	
	n	2,23313	0,22117	10,10	1,7403	2,7259	
0,25 – 0,35	θ_r	0,10278	0,04610	2,23	0,0001	0,2055	0,9843
	θ_s	0,36913	0,00974	37,88	0,3474	0,3908	
	α	0,08051	0,03967	2,03	0,0079	0,1689	
	n	1,20659	0,07940	15,20	1,0297	1,3835	
0,35 – 0,45	θ_r	0,18641	0,01489	12,52	0,1532	0,2196	0,9657
	θ_s	0,39800	0,01404	28,34	0,3667	0,4293	
	α	0,04994	0,02063	2,42	0,0040	0,0959	
	n	1,54094	0,17556	8,78	1,1498	1,9321	
0,45 – 0,55	θ_r	0,16470	0,01483	11,10	0,1316	0,1978	0,9832
	θ_s	0,42232	0,01192	35,42	0,3958	0,4489	
	α	0,07900	0,02650	2,98	0,0199	0,1381	
	n	1,42523	0,09846	14,48	1,2059	1,6446	
0,55 – 0,65	θ_r	0,16350	0,01379	11,85	0,1328	0,1942	0,9844
	θ_s	0,43329	0,01194	36,27	0,4067	0,4599	
	α	0,05694	0,01675	3,40	0,0196	0,0943	
	n	1,48936	0,10803	13,79	1,2486	1,7301	

Tabela 6 – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção para cada camada do perfil do solo

(conclusão)

Camada (m)	Parâmetro	Valor	Desv.padrão	Valor t	Intervalo de confiança		r ²
					95%		
					Inferior	Superior	
0,65 – 0,75	θ_r	0,18294	0,00720	25,41	0,1669	0,1990	0,991
	θ_s	0,42909	0,00843	50,91	0,4103	0,4479	
	α	0,05505	0,01055	5,22	0,0315	0,0785	
	n	1,61295	0,09311	17,32	1,4055	1,8204	
0,75 – 0,85	θ_r	0,16884	0,00824	20,50	0,1505	0,1872	0,992
	θ_s	0,43673	0,00861	50,71	0,4175	0,4559	
	α	0,05847	0,01135	5,15	0,0332	0,0838	
	n	1,55142	0,08154	19,03	1,3697	1,7331	
0,85 – 0,95	θ_r	0,18189	0,00906	20,08	0,1617	0,2021	0,9871
	θ_s	0,43440	0,01027	42,30	0,4115	0,4573	
	α	0,04607	0,01034	4,45	0,0230	0,0691	
	n	1,63881	0,11983	13,68	1,3718	1,9058	
0,95 – 1,05	θ_r	0,16383	0,00968	16,92	0,1423	0,1854	0,9892
	θ_s	0,44495	0,01052	42,29	0,4215	0,4684	
	α	0,05560	0,01219	4,56	0,0285	0,0828	
	n	1,57695	0,09844	16,02	1,3576	1,7963

Figura 12 - Curvas de retenção para cada camada de solo em estudo (continua)

Figura 12 - Curvas de retenção para cada camada de solo em estudo

(conclusão)

2.3.1.4 Condutividade hidráulica do solo

Os resultados de K_s pelo método do permeâmetro de carga decrescente (PCD) são apresentados na Tabela 7. Verificou-se não normalidade de K_s utilizando o teste Shapiro-Wilk. Como resultado, tiveram que ser normalizados com a função logaritmo e, com eles, calculou-se a média e o desvio-padrão de cada profundidade. Finalmente, os resultados foram transformados novamente com a função antilogaritmo. Os coeficientes de variação de K não foram elevados sabendo-se que a condutividade hidráulica saturada e não saturada tem frequentemente coeficientes de variação maiores que 100% (KUTILEK; NIELSEN, 1994).

Para verificar se as frações granulométricas, densidade do solo, conteúdo de matéria orgânica e argila dispersa em água afetaram K_s , foram realizadas análises de regressão múltipla

empregando o procedimento de seleção “stepwise” (SAS, 1991). Como resultado, comprovou-se que K_s foi negativamente relacionada com a densidade do solo e positivamente com conteúdo de areia e de matéria orgânica, como mostra a eq. (10) ($r^2=0,6823$; $F=90,21$; $n=130$, $P < 0,1$):

$$\log(K_s) = 6,3169 + 0,0394\text{Are} - 4,962\rho + 0,2091\text{MO} \quad (10)$$

sendo: $\log(K_s)$ o logaritmo decimal da K_s (mm h^{-1}); Are a % de areia; ρ a densidade do solo (Mg m^{-3}) e MO a % de matéria orgânica.

Utilizando o conteúdo de areia (Are) e de matéria orgânica (MO) de cada camada (Tabela 3), foi calculado o $\log(K_s)$ em função da densidade do solo (Figura 13a). No intervalo de ρ obtidas na amostragem, K_s variou de baixa a muito elevada segundo a classificação apresentada por Kutilek e Nielsen (1994). Como as amostras foram retiradas na entrelinha das soqueiras, lugar não afetado pela sulcação no plantio, provavelmente nas linhas onde foram instalados os tensiômetros e extratores de solução do solo, K aumente, favorecendo-se o transporte de água e solutos. A Figura 13b, mostra também, que a remoção de camadas compactadas teria maior influência em superfície devido ao maior conteúdo de areia e de matéria orgânica.

Por outro lado, a camada de impedimento localizada entre 0,15 e 0,45 m de profundidade parece ter afetado o processo de redistribuição da água no perfil do solo, como mostram os dados obtidos no ensaio do perfil instantâneo (PI) (Tabela 8, Figura 14). Consequentemente, poderia ser afetada a dinâmica do transporte de água e solutos.

Tabela 7 - Condutividade hidráulica saturada (K_s) nas diferentes camadas do perfil do solo. Os dados correspondem à média de todos os tratamentos para cada camada

Camada (m)	K_s (mm h^{-1})
0,00 – 0,15	38,4 (42,0)
0,15 – 0,25	25,7 (33,3)
0,25 – 0,35	14,3 (44,6)
0,35 – 0,45	18,4 (45,7)
0,45 – 0,55	31,0 (37,3)
0,55 – 0,65	46,7 (25,2)
0,65 – 0,75	54,3 (22,9)
0,75 – 0,85	57,3 (28,1)
0,85 – 0,95	59,5 (15,6)
0,95 – 1,05	58,3 (19,4)

Valores entre parênteses são os coeficientes de variação de cada determinação ($n=13$ por camada de solo).

Figura 13 - Influência da densidade do solo na condutividade hidráulica do solo saturado em todas as camadas de solo estudadas pelo método do permeâmetro de carga decrescente. No gráfico da esquerda (a) a escala das ordenadas é logarítmica e as linhas verticais indicam o intervalo de densidade do solo obtido no experimento; no da direita (b) a escala das ordenadas é decimal

A Figura 14 mostra que as variações de conteúdo de água volumétrico são cada vez menores com o transcurso do tempo e foram baixas no final da redistribuição. Pode-se observar, também, que não foi possível saturar completamente o perfil do solo e, por tal motivo, não foi possível estimar a condutividade hidráulica de saturação utilizando o método do PI.

Como não foi possível saturar o solo, θ_0 foi menor a θ_s (parâmetro de ajuste da CR) em todas as profundidades (Figura 14). Quando θ_0 é menor que θ_s , K_0 não pode ter a interpretação física da condutividade hidráulica do solo saturado. Esta foi uma desvantagem do método do perfil instantâneo na estimativa de $K(\theta)$. Além disso, como a relação entre K e θ é exponencial, pequenas variações de θ poderiam induzir importantes variações na estimativa da condutividade hidráulica perto de saturação, erro que se pode propagar posteriormente na estimativa do fluxo diário de água e, portanto, na determinação do fluxo de solutos.

Por outro lado, o potencial mátrico apresentou baixas variações no fim da redistribuição, com os valores variando de -120 a -205 cm_{H₂O} em todas as profundidades. Isto confirma que é difícil atingir valores de potencial mátrico inferiores a -200 cm_{H₂O} com o método da drenagem interna (DIRKSEN, 1991; GHIBERTO, 1999), ficando o solo num conteúdo hídrico que não é próximo a θ_r . Sendo a faixa de conteúdo de água na qual são feitas as medições, menor que a representada pelos parâmetros θ_s e θ_r , a equação $K=K_0\exp\gamma(\theta-\theta_0)$ fica restrita devido ao fato de não poderem ser extrapoladas fora do intervalo de umidade em que foram obtidas. Dirksen

(1991) mostra que a faixa de conteúdo hídrico e potencial mátrico na qual $K(\theta)$ pode ser determinada é a principal desvantagem deste método de campo. Mas é importante enfatizar também que valores significantes de drenagem interna só ocorrem na faixa úmida de conteúdo de água no solo.

Explicitando θ da eq. (2) (item 2.2.3.2.3), considerando unitário o gradiente de potencial total e a densidade de fluxo de água à capacidade de campo (CC) igual a $0,1 \text{ mm d}^{-1}$ (ROMANO; SANTINI, 2002), é fácil perceber que:

$$CC = \theta_o + (1/\gamma) \ln(0,1/K_o) \quad (11)$$

A Figura 14 mostra que no ensaio de drenagem interna não foi possível atingir esse valor na profundidade de controle, 0,9 m, mesmo depois de transcorridas 1000 horas de redistribuição (θ_{1000h}). Este conteúdo de água no perfil será considerado neste trabalho como o limite entre a água móvel e imóvel, sendo a fração de água móvel a que mais participa no transporte de solutos por estar contida em poros melhor conectados.

Tabela 8 - Parâmetros de ajuste da função $K(\theta)$ obtida pelo método do perfil instantâneo. Os coeficientes de correlação correspondem à regressão $\ln K$ vs. θ

Camada (m)	θ_o ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	γ	K_o (mm d^{-1})	r^2
0,0 – 0,1	0,378	49,445	25,0	0,996
0,1 – 0,2	0,386	40,106	81,8	0,992
0,2 – 0,3	0,324	112,7	197,4	0,999
0,3 – 0,4	0,303	128,72	169,8	0,999
0,4 – 0,5	0,332	80,677	134,1	0,998
0,5 – 0,6	0,342	73,869	211,7	0,997
0,6 – 0,7	0,328	88,215	409,0	0,998
0,7 – 0,8	0,395	48,082	458,9	0,995
0,8 – 0,9	0,354	67,435	515,2	0,997
0,9 – 1,0	0,339	69,056	470,7	0,996

Figura 14 - Conteúdo volumétrico de água em profundidade nos diferentes tempos de redistribuição pelo método do perfil instantâneo

A Tabela 9 mostra os valores de condutividade hidráulica obtidos com infiltrômetro de tensão a 0,9 m de profundidade. A distribuição da condutividade hidráulica obtida com IT a 0,9 m de profundidade foi normal (Tabela 9). Os coeficientes de variação foram similares aos encontrados por outros autores e diminuíram com o aumento da tensão aplicada como era de se esperar. O $\log(K_s)$ pelo PCD foi significativamente menor (teste LSD; $P < 0,05$) que o $\log(K_{0,6})$ pelo IT, possivelmente pela mínima alteração da estrutura com IT e a dificuldade em saturar amostras no laboratório. A 2,5, 5 e 10 cm de tensão os logaritmos de K foram iguais entre os dois métodos. Já no caso de K_o a 0,9 m de profundidade pelo método do PI (eq. 2), foi menor que a condutividade hidráulica medida com o infiltrômetro de tensão principalmente pelo fato de θ_o ser menor que o conteúdo volumétrico de água de saturação.

Tabela 9 - Estatística descritiva dos valores de condutividade hidráulica obtidos com infiltrômetro de tensão na profundidade de 0,9 m

Variável	Condutividade hidráulica (cm h ⁻¹)				Parâmetro α_{Ankeny}			
	K _{0,6}	K _{2,5}	K ₅	K ₁₀	$\alpha_{0,6}$	$\alpha_{2,5}$	α_5	α_{10}
Média	11,12	9,51	7,58	5,87	0,0658	0,0686	0,0715	0,0718
Mediana	9,84	9,14	7,61	5,33	0,0603	0,0718	0,0651	0,0695
Desvio-padrão	6,55	3,63	3,47	1,80	0,0364	0,0270	0,0442	0,0174
C.V. (%)	58,9	38,2	45,8	30,7	55,4	39,4	62,0	24,2
Mínimo	2,22	2,24	2,26	3,27	0,0173	0,01833	0,04203	0,0470
Maximo	27,06	16,59	15,55	8,75	0,1532	0,1035	0,1712	0,1028
Curtose	2,30	1,18	1,87	-0,77	1,97	-0,77	1,08	-0,63
1º Quartil	6,88	7,62	5,79	4,69	0,0387	0,0488	0,0421	0,0587
3º Quartil	14,13	11,14	9,17	7,40	0,0840	0,0911	0,0968	0,0839
Teste W	0,90533	0,9666	0,9283	0,9012	0,9136	0,9494	0,9358	0,9664
P<W	0,1858	0,8717	0,3631	0,1644	0,2373	0,6282	0,4455	0,8698

2.3.2 Componentes do balanço hídrico

Na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 são apresentados os resultados dos componentes do balanço hídrico para cada tratamento nos períodos de monitoramento. A seguir, são apresentados com detalhe, os resultados de cada um dos componentes deste balanço nos itens 2.3.2.1, 2.3.2.2, 2.3.2.3 e 2.3.2.4. No ANEXO C (Tabela 21) se pode observar o resultado da análise estatística referente aos componentes do balanço hídrico.

Tabela 10 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 1, avaliados ao longo dos períodos

Período		P	ΔH	D/AC	ET _r	ET _r /dia
Nº	Data	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm d ⁻¹)
1	16/11	152	...	-40,5 (28,1)	...	...
2	17/11 - 6/12	85	15,4 (9,2)	-13,0 (5,2)	-56,8 (8,9)	-2,8 (0,4)
3	7/12 - 18/12	41	2,4 (3,8)	-17,1 (9,0)	-21,7 (11,9)	-1,8 (1,0)
4	19/12 - 19/1	481	24,5 (6,2)	-107,9 (43,4)	348,3 (37,9)	-10,9 (1,2)
5	20/1 - 8/2	94	-21,0 (6,6)	-38,0 (19,4)	-76,6 (22,0)	-3,8 (1,1)
6	9/2 - 2/3	154	2,6 (3,8)	-30,8 (30,8)	-120,6 (34,4)	-5,5 (1,6)
7	3/3 - 23/3	124	-3,2 (4,1)	-19,3 (20,4)	-107,7 (21,0)	-5,1 (1,0)
8	24/3 - 20/4	23	-53,9 (11,9)	-14,2 (11,9)	-62,9 (10,7)	-2,2 (0,4)
9	21/4 - 25/5	100	38,3 (14,9)	-2,1 (13,6)	-59,6 (19,4)	-1,7 (0,6)
10	26/5 - 21/6	12	-27,8 (10,8)	-15,3 (8,7)	-24,7 (8,8)	-0,9 (0,3)
11	22/6 - 9/7	-	-20,6 (3,6)	-1,8 (2,5)	-18,8 (4,9)	-1,0 (0,3)
Total		1266	-43,3 (26,6)	-300,0 (70,2)	-897,7 (66,1)	...

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 1: sem adubação de N e S nos ciclos de cana-planta e primeira soca.

Tabela 11 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 2, avaliados ao longo dos períodos

Período		P	ΔH	D/AC	ET _r	ET _r /dia
Nº	Data	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm d ⁻¹)
1	16/11	152	...	-47,9 (30,2)	...	...
2	17/11 - 6/12	85	10,7 (6,9)	-7,8 (15,1)	-66,7 (16,0)	-3,3 (0,8)
3	7/12 - 18/12	41	11,2 (2,6)	-18,0 (7,5)	-12,0 (9,0)	-1,0 (0,7)
4	19/12 - 19/1	481	24,4 (16,2)	-122,3 (65,4)	-334,0 (62,9)	-10,4 (2,0)
5	20/1 - 8/2	94	-20,9 (9,5)	-58,7 (39,4)	-55,9 (41,5)	-2,8 (2,1)
6	9/2 - 2/3	154	4,4 (6,7)	-27,4 (29,0)	-122,2 (30,1)	-5,6 (1,4)
7	3/3 - 23/3	124	-4,2 (5,2)	-25,2 (10,8)	-102,8 (13,0)	-4,9 (0,6)
8	24/3 - 20/4	23	-47,2 (3,9)	-13,8 (9,9)	-56,6 (11,2)	-2,0 (0,4)
9	21/4 - 25/5	100	22,2 (11,1)	-14,2 (19,6)	-63,6 (28,3)	-1,8 (0,8)
10	26/5 - 21/6	12	-11,2 (14,9)	-12,7 (9,9)	-10,8 (16,9)	-0,4 (0,6)
11	22/6 - 9/7	-	-26,7 (13,4)	-3,8 (3,5)	-22,9 (16,7)	-1,3 (0,9)
Total		1266	-37,3 (31,9)	-351,8 (92,6)	-847,5 (92,6)	...

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 2: 80 kg ha⁻¹ de N no ciclo de cana-planta e, na primeira soca, 100 kg ha⁻¹ de N e 114 kg ha⁻¹ de S.

Tabela 12 - Precipitação pluvial (P), drenagem interna (D), ascensão capilar (AC) e evapotranspiração real (ET_r) da cana-de-açúcar no Tratamento 3, avaliados ao longo dos períodos

Período		P	ΔH	D/AC	ET _r	ET _r /dia
Nº	Data	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm d ⁻¹)
1	16/11	152	...	-20,8 (22,5)	...	...
2	17/11 - 6/12	85	9,0 (7,8)	-1,8 (3,6)	-74,4 (10,6)	-3,7 (0,5)
3	7/12 - 18/12	41	10,4 (11,3)	-11,7 (4,9)	-19,1 (8,5)	-1,6 (0,7)
4	19/12 - 19/1	481	28,4 (8,6)	-75,6 (46,8)	-376,8 (42,2)	-11,8 (1,3)
5	20/1 - 8/2	94	-24,9 (3,2)	-28,8 (9,2)	-89,7 (12,1)	-4,5 (0,6)
6	9/2 - 2/3	154	9,0 (7,3)	-23,4 (9,1)	-121,6 (9,7)	-5,5 (0,4)
7	3/3 - 23/3	124	-8,8 (2,9)	-16,1 (8,5)	-116,5 (8,4)	-5,5 (0,4)
8	24/3 - 20/4	23	-51,8 (10,5)	-9,9 (5,9)	-65,1 (12,0)	-2,3 (0,4)
9	21/4 - 25/5	100	51,6 (7,3)	-2,2 (6,0)	-46,2 (11,6)	-1,3 (0,3)
10	26/5 - 21/6	12	-37,8 (9,0)	-7,7 (5,5)	-42,3 (11,1)	-1,6 (0,4)
11	22/6 - 9/7	-	-19,9 (1,6)	-0,8 (2,3)	-19,1 (2,0)	-1,1 (0,1)
Total		1266	-34,8 (24,1)	-198,8 (55,5)	-970,8 (51,8)	...

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 3: 120 kg ha⁻¹ de N no ciclo de cana-planta e, na primeira soca, 150 kg ha⁻¹ de N e 172 kg ha⁻¹ de S.

2.3.2.1 Precipitação pluvial

A precipitação pluvial no ciclo da primeira soca compreendido entre outubro de 2006 e julho de 2007 foi de 1406 mm, valor esse superior à média histórica do mesmo período (1285 mm), com distribuição irregular em relação às médias mensais (Figura 15). A precipitação em janeiro de 2007 (402 mm) superou a média histórica (251 mm), sendo o período de retorno

(TOLLNER, 2002) para que seja observado um evento da mesma magnitude ou superior, de 14 anos. O mês de maio teve um evento de chuva atípico de 100 mm sendo que a precipitação pluvial do mês foi 108 mm. Os meses restantes tiveram um comportamento similar à média histórica.

Nos meses de outubro, novembro e dezembro, em que tipicamente se produz a recarga de água no perfil do solo, o somatório da precipitação pluvial foi 523 mm, sendo que a média histórica do mesmo período é de 505 mm. Já contabilizando os meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março, meses em que existem excedentes hídricos calculados pelo balanço hídrico climatológico (SENTELHAS et al., 2009), é de se esperar que a soma de precipitações seja de 856 mm, mas em 2006-2007 esta foi de 950 mm.

Figura 15 - Pluviosidade média mensal de Jaboticabal no período 1936-2004 e medida no local nos meses de experimento

2.3.2.2 Armazenagem de água no solo

Utilizando a capacidade de campo determinada de forma analítica pela eq. 2 e o ponto de murcha permanente como o conteúdo de água correspondente à tensão de 15000 cm_{H₂O} estimado a partir da CR, verificou-se que a capacidade de água disponível (CAD) até 1,05 m de profundidade foi de 67 mm, ou seja, por cada cm de profundidade o solo acumula 0,64 mm de água disponível à cultura. Esse valor difere do calculado considerando capacidade de campo como o conteúdo de água em cada camada correspondente à tensão de 100 cm_{H₂O} e o ponto de

murcha permanente como o conteúdo de água correspondente à tensão de 15000 cm_{H₂O}, ambos utilizando a CR (Tabela 6), que resultou em 92 mm ou 0,88 mm cm⁻¹. Segundo Romano e Santini (2002), a CAD determinada utilizando a capacidade de campo determinada pela eq. 2 é mais realística do que a utilizando a capacidade de campo a partir da CR.

A Figura 16 mostra a quantidade média de água armazenada em cada tratamento nas diferentes datas de amostragem, com seu correspondente desvio-padrão. A armazenagem foi semelhante nos três tratamentos em cada amostragem realizada exceto no período 9 onde T₂ foi significativamente menor a T₁ e T₃. Os coeficientes de variação da armazenagem (H) estiveram compreendidos entre 1,4 e 5,5%, mostrando a baixa variabilidade desta medida (WARRICK; NIELSEN, 1980; REICHARDT et al., 1993). Por outro lado, os desvios-padrão da variação de armazenagem (ΔH) foram elevados em relação à grandeza da medida (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12) e estes erros propagaram-se, posteriormente, no cálculo da evapotranspiração da cultura.

Observou-se que quando a variação de armazenagem se aproximou de zero o desvio-padrão aumentou sendo, às vezes, maior que a média e originando o acréscimo do coeficiente de variação de cada período, similar ao encontrado por Reichardt et al. (1993) e Silva et al. (2007). Baixos coeficientes de variação de H e elevados de ΔH , também foram apresentados por Villagra et al. (1995) quando estudaram a influência dos componenets do balanço hídrico no cálculo da evapotranspiração em um Latossolo Vermelho com 60% de argila. Deve-se salientar que, no presente experimento, as amostragens de perfil de umidade foram realizadas em lugares diferentes da mesma parcela (Figura 3) utilizando um método destrutivo, possivelmente contribuindo para o aumento da variabilidade na determinação da armazenagem.

A quantidade máxima de água armazenada foi registrada em 19/1/2007 nos três tratamentos e as menores em 20/4/2007 e 9/7/2007. Entre 23/10/2007 e 18/12/2007 a precipitação pluvial foi de 278 mm e a armazenagem média dos tratamentos aumentou de 213 mm para 233 mm no perfil do solo até 0,9 m de profundidade (Figura 16). A armazenagem de água na capacidade de campo ($CC = 0,237 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi superada nas amostragens do dia 18/2/2007 e do dia 23/3/2007 sendo a precipitação pluvial entre essas datas de 893 mm. O maior decréscimo na armazenagem foi no período 8 nos três tratamentos (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12) e coincidiu com baixas precipitações e elevada demanda de água pela cultura, visto que, segundo

informação de Faroni (2008), os períodos 7 e 8 coincidem com o final da fase fenológica de máximo crescimento. A armazenagem de água aumentou em 25/5/2007 devido à chuva atípica acontecida nesse mês, como mostrado na Figura 15 (ver também período 9 na Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12).

Comparando o conteúdo volumétrico de água no perfil do solo (Figura 16) com os dados do intervalo hídrico ótimo (IHO, ANEXO B) a cultura não teve severas restrições na disponibilidade de água, resistência mecânica à penetração das raízes ou aeração até o 23/3/2007. Este fator tem importância porque as raízes, presumivelmente, conseguiram explorar o solo sem limitações na fase de crescimento máximo da cana-de-açúcar apesar da presença de camadas limitantes entre 0,25 e 0,55 m de profundidade. A falta de restrições físicas na fase de crescimento máximo permitiu à cana-de-açúcar aproveitar de maneira melhor o N e S fertilizantes, aumentando a produtividade média da cana-soca nos tratamentos avaliados (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N-sulfato de amônio aplicados) (FARONI, 2008).

Figura 16 - Armazenagem de água (H) na camada de 0 a 0,95 m de profundidade nos diferentes períodos de amostragem, nos tratamentos T₁, T₂ e T₃. A linha horizontal pontilhada representa a armazenagem na capacidade de campo (H_{cc}) até 0,95 m. Indica-se o desvio-padrão correspondente às quatro repetições de cada tratamento. DAC: dias após colheita da cana-planta

Utilizando a técnica de Rose e Stern (1967) apud Reichardt e Timm (2004), determinou-se a razão média de absorção radicular (r) em cada camada e calculou-se a distribuição percentual da atividade radicular. Deve-se esclarecer que para fazer essa estimativa foram feitas as seguintes simplificações: (1) não houve precipitação pluvial nos períodos avaliados, (2) desprezou-se a

evaporação do solo e (3) a drenagem no perfil foi nula. Mesmo sendo presupostos fortes, escolheram-se os períodos 8 e 11 porque, nesses períodos, a precipitação pluvial foi baixa ou nula, a cultura e a palha cobriam o solo diminuindo o efeito da evaporação na superfície (aproximadamente 8,425 Mg ha⁻¹ de palhada em 14/2/2007) e a drenagem foi baixa (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12).

A Tabela 13 mostra os valores de r (%) que representam a contribuição de cada camada para o total evapotranspirado. Esses valores indicam as zonas no perfil de solo afetadas pela transpiração e são um reflexo da atividade radicular da cultura. No período 8, a cultura encontrava-se na fase final de crescimento máximo e no 11 já em senescência. Mesmo assim, observou-se que 69 e 73% da água evapotranspirada pela cana-de-açúcar foi proveniente do primeiro 0,65 m de profundidade do solo. As camadas superficiais foram as que mais contribuíram, mas deve observar-se que nestes dois períodos, que foram os mais secos do ciclo todo, a cana-de-açúcar utilizou água de camadas profundas. Da evolução do conteúdo de água no solo média de cada tratamento (Figura 17), pode-se inferir também que a região de maior absorção radicular estaria compreendida entre 0 e 0,65 m de profundidade.

Apesar das simplificações efetuadas, os resultados mostraram a importância de manter a qualidade do solo para o enraizamento da cana-de-açúcar de forma a melhorar o suprimento de água em períodos de estresse hídrico e também favorecer a reciclagem de nutrientes de camadas profundas.

Tabela 13 - Razão média de absorção radicular (r) em cada camada e distribuição percentual da atividade radicular

Camada (m)	Período: 8						Período: 11					
	r_{zi-zi} (mm cm ⁻¹ d ⁻¹)			r_{zi-zi} (%)			r_{zi-zi} (mm cm ⁻¹ d ⁻¹)			r_{zi-zi} (%)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃
0,00 – 0,15	0,397	0,317	0,383	19	17	19	0,259	0,390	0,232	21	25	19
0,15 – 0,25	0,258	0,213	0,207	13	12	10	0,185	0,252	0,160	15	16	13
0,25 – 0,35	0,213	0,184	0,209	10	10	10	0,101	0,187	0,132	8	12	11
0,35 – 0,45	0,230	0,173	0,214	11	9	11	0,113	0,157	0,103	9	10	8
0,45 – 0,55	0,210	0,165	0,186	10	9	9	0,094	0,126	0,121	8	8	10
0,55 – 0,65	0,181	0,158	0,175	9	9	9	0,096	0,114	0,100	8	7	8
0,65 – 0,75	0,167	0,150	0,158	8	8	8	0,100	0,113	0,085	8	7	7
0,75 – 0,85	0,143	0,160	0,160	7	9	8	0,096	0,095	0,086	8	6	7
0,85 – 0,95	0,127	0,168	0,159	6	9	8	0,096	0,048	0,087	8	3	7
0,95 – 1,05	0,135	0,161	0,164	7	9	8	0,092	0,049	0,111	7	3	9

Figura 17 - Evolução do conteúdo volumétrico de água no perfil do solo em: (a) Tratamento 1, (b) Tratamento 2 e (c) Tratamento 3

2.3.2.3 Drenagem interna e Ascensão capilar

Neste item apresentam-se os resultados dos diferentes termos da equação de Darcy-Buckingham (eq. 5), necessários para o cálculo do fluxo diário de água (D ou AC), e os resultados da aplicação de mencionada equação nos meses de monitoramento para cada tratamento. Como se mostra no Anexo C, não se registraram diferenças significativas de D/AC entre tratamentos devido à elevada variabilidade registrada na medida do fluxo de água. Esse aspecto será discutido a continuação devido à estreita relação que têm com a quantificação da lixiviação.

Os tensiômetros utilizados apresentaram algumas limitações advindas provavelmente da condutância hidráulica das cápsulas porosas e do sistema de aquisição dos valores de potencial mátrico da água, fatores que segundo Klute e Gardner (1962) afetam de forma inversa o tempo de resposta dos equipamentos. O manômetro de Bourdon produz uma leitura análoga que requer a conversão dessa resposta física em potencial mátrico, e requer grande deslocamento de fluido antes de registrar mudanças de potencial (MULLINS, 1991), sendo que os utilizados tinham uma precisão na leitura de 20 mmHg ($\sim 27 \text{ cm}_{\text{H}_2\text{O}}$). Além disso, como os tensiômetros eram preenchidos com água deaerada semanalmente, variações no volume de água e ar dentro do tensiômetro também podem ter afetado a sensibilidade dos equipamentos (MULLINS, 1991; YOUNG; SISSON, 2002). As flutuações de temperatura deveriam ter afetado pouco as leituras porque as variações de temperatura são menores em profundidade e as leituras efetuaram-se entre as 7h 30min e 8h, em condição térmica mais estável como recomendado por Young e Sisson (2002) e Brito et al. (2009).

As leituras diárias dos tensiômetros a 0,9 m de profundidade foram convertidas em potencial mátrico (BRITO et al., 2009) e posteriormente utilizando a CR (Tabela 6, Figura 12), em conteúdo de água volumétrico (θ).

A Figura 18, mostra a evolução de θ a 0,9 m de profundidade durante os meses de monitoramento em T_1 , T_2 e T_3 . A evolução de θ teve um comportamento semelhante nas quatro repetições de cada tratamento, não apresentando-se um desvio-padrão elevado. Os coeficientes de variação médios no período de monitoramento foram 2,5, 4,3 e 2,1% para T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente, estando esses valores médios compreendidos entre 0,1 e 16,9%. Deve destacar-se que a variação na estimativa real de θ , originou diferentes resultados de K calculada pela eq. 2, erro que se propagou, posteriormente, no cálculo do fluxo de água como se pode observar pelo elevado desvio-padrão do fluxo (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12). A grande influência da determinação de θ na estimativa K foi mencionada em diferentes estudos (FALLEIROS et al., 1998; SILVA et al., 2007), sendo atribuída à relação exponencial da função $K(\theta)$. O mencionado comportamento seria mais importante em solos de condutividade hidráulica de moderada a alta como as do presente experimento.

A variação do conteúdo volumétrico de água a 0,9 m durante o período monitoramento foi similar a da armazenagem de água no perfil do solo em todos os tratamentos (Figura 16). Os

maiores valores de θ coincidiram com os períodos 3, 4, 5, 6, e 7 (Figura 16) e, como mostram os resultados, θ nunca atingiu a saturação ($\theta_s = 0,434 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, parâmetro de ajuste da eq. 3) mas superou numa grande parte do ciclo a capacidade de campo ($CC = 0,237 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na maior parte do final do ciclo, θ foi inferior a $0,237 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Nesta condição, como K é muito baixa, precisa-se-ia de um gradiente de potencial de água no solo elevado para que o fluxo de água seja considerável.

Figura 18 - Evolução do conteúdo volumétrico médio de água (θ) de quatro repetições (linha contínua) a 0,9 m de profundidade durante os meses de monitoramento e valores médios mais e menos o desvio-padrão (linha pontilhada) em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2; (c) Tratamento 3

Com os tensiômetros instalados a 0,8 e 1,0 m de profundidade, foi possível avaliar o potencial total da água no solo. O processo predominante foi o de drenagem visto que o potencial total da água no solo (ψ_t) a 0,8 m foi maior que a 1,0 m de profundidade em quase todo o período de monitoramento (Figura 19, Figura 20, Figura 21).

Figura 19 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , mca) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 20 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , mca) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 21 - Evolução do potencial total da água no solo (ψ_t , mca) a 0,8 e 1,0 m de profundidade do Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

O gradiente de potencial total da água no solo ($\Delta\psi/L$) foi positivo e variou entre zero e 5 na maior parte do ciclo em todos os tratamentos (Figura 22), indicando, como fora mencionado, que predominou a drenagem. O valor médio de $\Delta\psi/L$ no ciclo todo foi 0,7 no T_1 , 1,5 em T_2 e 0,6 em T_3 , valores perto de 1,0, devido à homogeneidade dos atributos do solo entre 0,8 e 1,0 m de profundidade. Além da camada de solo ser homogênea, trabalhos de pesquisa utilizando o método do perfil instantâneo na estimativa da função $K(\theta)$ salientam que o gradiente permanece perto da unidade em condições de solo mais úmido, desviando-se desse valor quando avança o processo de redistribuição e o solo seca (BACCHI; REICHARDT, 1993; GHIRBERTO, 1999).

Os maiores desvios do gradiente em torno da média, registraram-se quando o solo esteve mais seco, entre 22/4/2007 e 27/5/2007 nos três tratamentos. Os resultados podem ser atribuídos a que o potencial mátrico apresenta maior variação em períodos secos que em períodos úmidos (VILLAGRA et al., 1988; REICHARDT et al., 1998). Yeh; Gelhar e Wierenga (1986) afirmam que a variância do potencial mátrico cresce quando a média em valor absoluto de potencial aumentava, demonstrando a natureza não estacionária da variação do potencial mátrico da água no solo. O comportamento mencionado pode ser explicado pela influência dos equipamentos de medida, pela variabilidade do solo e pelos processos envolvidos na redistribuição da água no solo (YEH; GELHAR; WIERENGA, 1986; VILLAGRA et al., 1988).

A falta de uniformidade nos processos de secamento e umedecimento podem ter acontecido no fim da fase de crescimento máximo da cana-de-açúcar, influenciando a medida do gradiente nos diferentes tratamentos. Em tal sentido, Libardi et al. (1996), estudaram a variabilidade espacial da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico comprovando que com um menor teor de água no solo aumentava a dispersão na amostragem e, após eventos de chuva, os indicadores da variabilidade não se restituíam ao valor inicial. Concluíram também que a variabilidade do teor de água no solo depende do valor médio desse teor, sendo mais pronunciada quando o teor médio de água no solo foi menor. Como fora mencionado, esse comportamento foi também encontrado no potencial mátrico (YEH; GELHAR; WIERENGA, 1986) e tem como implicância prática que o número de equipamentos para determinar o teor ou o potencial de água varia com o conteúdo de água no solo (LIBARDI et al., 1996).

Outra colocação importante se refere à variabilidade da redistribuição da água no solo após eventos de precipitação pluvial. Como aconteceu em 25/5/2007 quando precipitaram 100

mm de água, observou-se que a frente de molhamento atingiu o tensiômetro a 0,8 m de profundidade e não o de 1,0 m, dificultando a estimativa do gradiente de potencial total de água no solo. Como as leituras eram espaçadas por 24 horas, depois de eventos de chuva, a frente de molhamento poderia ou não ser registrada dependendo da magnitude do evento, do conteúdo inicial de água no solo e do momento do dia/noite em que se produziu a chuva.

De acordo com a literatura, a maior variabilidade das medidas em condição de solo mais seco em relação aos equipamentos é atribuída normalmente a: (1) maior variação do volume de água dentro do tensiômetro tendo que ser preenchidos com água com maior frequência: o maior conteúdo de ar dentro dos tensiômetros piora o tempo de resposta aumentando-lo e altera o valor das leituras (MULLINS, 1991); (2) segundo Mullins (1991), quando o tensiômetro é reabastecido, alguma água pode passar para o solo no entorno da cápsula e as leituras tomadas em seguida não são reais; (3) quando K é baixa, o solo limita o tempo de resposta do equipamento, podendo ser esta também uma fonte de erro (KLUTE; GARDNER, 1962). Apesar das colocações mencionadas, Villagra et al. (1988) superaram a variância total de leituras de tensiômetros com manômetro de mercúrio devido ao instrumento (tensiômetro) e ao local (o solo) numa “Terra Roxa Estruturada” (Oxic Paleudalf) concluindo que a variância instrumental era desprezível em relação à do solo. Yeh, Gelhar e Wierenga (1986) obtiveram resultados semelhantes.

A necessidade de aumentar a frequência de leituras para estimar o fluxo de água foi mencionada por Renck e Lehmann (2004) propondo intervalos de 30 minutos entre leituras. Chegaram nessa conclusão depois de estudar um Latossolo (Xanthic Hapludox) localizado na Amazônia central com forte microagregação. Os autores observaram que transcorridas 2 horas depois de uma chuva de 48 mm a água atingia 0,9 m de profundidade. Fenômenos deste tipo foram registrados quando o solo estava úmido, numa tensão entre 2 e 3 kPa e atribuíram esses resultados à presença de fluxo preferencial por macroporos. Resultados semelhantes foram obtidos neste experimento como se verá a seguir.

Figura 22 - Evolução do gradiente de potencial total de água médio de quatro repetições (linha contínua) e, valores médios mais e menos o desvio-padrão (linha pontilhada) a 0,9 m de profundidade durante os meses de monitoramento, em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2; (c) Tratamento 3

Utilizando o conteúdo volumétrico de água no solo (θ), o gradiente de potencial total e a condutividade hidráulica do solo a 0,9 m de profundidade, estimou-se o fluxo diário de água de cada tratamento com a equação de Darcy-Buckingham (eq. 5) em todo o período de monitoramento (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12).

A maior dispersão nas estimativas ocorreu no processo de drenagem interna e nos períodos de maior precipitação pluvial, sendo os erros desse processo propagados na estimativa da ET_r como discutido por Brito; Libardi e Ghiberto (2009). O desvio-padrão da D/AC atingiu

23,4% no T₁, 26,3% no T₂ e 27,9% no T₃ da D/AC total. Os valores elevados de dispersão da densidade de fluxo podem ter sido decorrentes da variação espacial das propriedades físico-hídricas do solo e da relação exponencial entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo. Nielsen, Biggar e Erh (1973) assinalaram que áreas aparentemente uniformes apresentaram grandes variações na condutividade hidráulica, embora textura, densidade do solo e conteúdo de água tivessem pouca variação.

Villagra et al. (1995) discutiram o problema da variabilidade do balanço hídrico em um estudo compreendendo 25 repetições e atribuíram à estimativa do fluxo de água para baixo da zona radicular como o principal problema na determinação do balanço hídrico. Sem mostrar como se propagaram os erros no balanço, verificaram que o coeficiente de variação do fluxo de água foi 60%, concluindo que os enfoques baseados em observações atmosféricas constituem a melhor opção na estimativa da ET_r. Baseados nesse conceito, outros autores (SILVA, A.L. et al., 2006; SILVA et al., 2007), estimaram de forma indireta a drenagem de água para baixo da zona radicular, argumentando que a variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas, o caráter exponencial da função $K(\theta)$ e a precisão na medida do conteúdo e do potencial da água no solo, não permitem produzir estimações consistentes da drenagem utilizando a equação de Darcy-Buckingham.

Apesar das limitações metodológicas na estimativa do fluxo de água mencionadas, a drenagem a 0,9 m de profundidade representou 24, 28 e 16 % do total precipitado. O resultado mostra que este componente do balanço hídrico deve ser quantificado e não estimado de forma indireta, especialmente quando se trata de determinar perdas de nutrientes por lixiviação, em que D/AC estão diretamente envolvidas na quantificação. Também mostra que este componente do balanço hídrico não pode ser considerado igual a zero, especialmente em solos com moderada a alta capacidade de conduzir água (REICHARDT; TIMM, 2004).

Nos momentos em que θ superou a capacidade de campo, o fluxo de água a 0,9 m de profundidade foi maior, coincidindo com a maior pluviosidade dos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março nos períodos 4, 5, 6 e 7 (Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12). A drenagem foi menor nos períodos secos, especialmente quando θ foi inferior a $0,237 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 18, Figura 23), que correspondeu a uma $K \leq 0,1 \text{ mm d}^{-1}$ (eq. 2). Em média dos três tratamentos, foram drenados 284 mm de água no ciclo, ou seja, 62 mm a menos que o excedente hídrico de 346 mm

calculado pelo método de Thornthwaite e Matter (1955) (SENTELHAS et al., 2009). Deve-se destacar que, mesmo sem registrar-se diferenças significativas no teste estatístico, a menor drenagem se registrou no T_3 (198,8 mm) no qual a cana-de-açúcar recebeu a máxima dose de fertilizante. A ascensão capilar em todo o ciclo foi muito baixa e em nenhum período de todos os tratamentos chegou a superar a quantidade de água drenada.

2.3.2.4 Evapotranspiração da cultura

A partir da determinação da drenagem interna (D) e/ou ascensão capilar diária (AC), da precipitação pluvial (P) e da armazenagem de água no solo (H) foram estimadas a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração real diária da cultura ($ET_r \text{ d}^{-1}$) de cada tratamento, juntamente com seu correspondente desvio-padrão (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12).

O desvio-padrão da ET_r para o ciclo representou 7,4; 10,9 e 5,3% da evapotranspiração total para T_1 , T_2 e T_3 respectivamente. Avaliando a propagação do desvio-padrão, pode observar-se que o componente que mais contribuiu na variação da ET_r foi a D/AC e que, com o aumento da drenagem o desvio-padrão propagado foi maior. Da mesma forma que apresentaram Brito; Libardi e Ghiberto (2009) é importante salientar que o desvio-padrão propagado representou menos do 15% da ET_r total.

O erro introduzido na estimativa da D/AC utilizando a equação de Darcy-Buckingham foi o principal argumento para a escolha de modelos que utilizam somente a condição meteorológica para o cálculo da ET_r (VILLAGRA et al., 1995; SILVA, A.L. et al., 2006; Silva et al., 2007). Deve ser visto que a transpiração da cultura depende, além da demanda atmosférica, da disponibilidade de água no solo e do tipo de cultura (ALLEN et al., 1998). Assim, por exemplo, no caso do presente estudo, diferentes doses de fertilizante foram aplicadas e influenciaram a produção da cana-de-açúcar (FARONI, 2008), fator que seria ignorado utilizando somente a condição meteorológica na estimativa da ET_r . Depreende-se desta observação, que a estimativa da drenagem de forma indireta teria também o problema mencionado.

Pela informação apresentada, a evapotranspiração medida foi 71, 67, e 77% do total precipitado para T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente, o que mostra a influência da cana-de-açúcar no ciclo da água deste agroecossistema. Os maiores valores de evapotranspiração diária foram registrados nos três tratamentos no período 4, coincidentemente com a fase de crescimento

máximo da cultura, sendo baixa nos três últimos períodos quando a cana-de-açúcar entrou em senescência.

Considerando que a capacidade de água disponível até 1,05 m de profundidade esteve compreendida entre 67 e 92 mm, com uma evapotranspiração média na fase de crescimento máximo de 5 mm d^{-1} , a cultura teria água disponível 13 a 18 dias se não houvesse aportes de água, seja por precipitações ou por AC de camadas subsuperficiais. Isto evidencia riscos quando as raízes exploram somente camadas superficiais do solo em anos de deficiência hídrica acentuada.

A eficiência do uso da água (EUA, razão entre a produtividade e a ET_r da cultura) no T_1 foi de $131,3 \text{ kg mm}^{-1}$, no T_2 de $146,6 \text{ kg mm}^{-1}$ e no T_3 de $127,5 \text{ kg mm}^{-1}$ visto que a produtividade média das parcelas de cada tratamento foi $116,250$, $121,944$ e $123,611 \text{ Mg ha}^{-1}$ de colmo industrializável, respectivamente; sem ser estatisticamente diferentes. A EUA foi muito semelhante à obtida por Brito, Libardi e Ghiberto (2009). Esses autores trabalharam no ciclo agrícola de cana-planta do presente experimento e verificaram que a EUA, no tratamento sem fertilizar com nitrogênio, foi de 137 kg mm^{-1} e de 142 kg mm^{-1} quando aplicados 120 kg ha^{-1} de N (ET_r de $1057,8$ e $1028,6 \text{ mm ha}^{-1}$ em cada tratamento); em similar condição agroecológica, mas em outro local (Pirassununga-SP, Brasil), a EUA foi de $132,6 \text{ kg mm}^{-1}$ com uma produtividade de $141,25 \text{ Mg ha}^{-1}$ e ET_r de $1067,1 \text{ mm}$. Os valores de produtividade apresentados estão dentro do intervalo apresentado por outros autores que utilizaram outro tipo de variedade de cana-de-açúcar em condições de solo e clima diferentes às deste experimento (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Figura 23 - Precipitação pluvial diária (barras) e fluxo de água durante o período estudado (linha contínua vermelha) em: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2 e (c) Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água no sistema

2.3.3 Concentração de cátions e ânions na solução do solo

Foi possível extrair solução do solo quando o potencial mátrico era superior a -40 kPa na profundidade de 0,9 m. Por esse motivo, no final do ciclo de monitoramento, entre 22/4/2007 e 24/5/2007 e depois do 26/6/2007 até colheita da cana-de-açúcar, não foi possível extrair solução do solo. Na Figura 18 é possível observar que nesses períodos o conteúdo volumétrico de água foi inferior a $0,221 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (calculado utilizando a CR a 0,9 m de profundidade, Tabela 6). Resultado semelhante obtiveram Ghiberto et al. (2009b) em solo da mesma classe textural também na profundidade de 0,9 m.

De forma geral, pode-se observar a importância de medições frequentes de concentração de solutos da solução no solo no período de monitoramento para poder captar da melhor forma, as mudanças no conteúdo de solutos na profundidade de controle como pode apreciar-se na Figura 24, Figura 25 e Figura 26.

Os resultados de pH da solução do solo obtidos apresentaram uma média para T_1 de 6,3, sendo o pH máximo médio 7,0 e o pH mínimo médio 5,6. No T_2 o pH médio, máximo médio e mínimo médio foi 6,1, 6,9 e 5,4 e, no T_3 6,4, 7,2 e 5,9 respectivamente.

Depois de comparar os somatórios da quantidade de ânions e cátions de cada amostra, expressos em $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$, observou-se um desequilíbrio no balanço iônico com predomínio de cátions. O desvio (δ) entre o somatório de ânions (Σ^-) e cátions (Σ^+) calculado por $\delta = (1 - (\Sigma^- / \Sigma^+)) * 100$, foi 32,5% no T_1 , 27,4% no T_2 e, no T_3 34,6%. O desequilíbrio iônico pode ser visualizado também, no ANEXO D (Figura 41, Figura 42 e Figura 43). São citados como fatores causadores desse desequilíbrio: limitações no processo de amostragem, perdas de compostos instáveis como volatilização do CO_2 e de NH_3 e a presença de íons não identificados nas amostras como o carbono orgânico dissolvido (WOLT, 1994). Também não foi considerado o nitrogênio orgânico dissolvido, mas pelo estudo de Renck e Lehmann (2004), existem evidências de que nas camadas superficiais a lixiviação de N orgânico foi maior que a de N inorgânico, mas no subsolo predominou o nitrogênio inorgânico.

Fernandes (2008) obteve resultados semelhantes quando avaliou a solução do solo a 0,9 m de profundidade utilizando extratores de solução com cápsula porosa. O solo tinha sido cultivado com cana-de-açúcar com aplicação de 120 kg ha^{-1} de N, 120 kg ha^{-1} de K_2O e de P_2O_5 e 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico. Além dos fatores anteriormente citados, o autor mencionou que o

desequilíbrio iônico pode ter sido decorrente do histórico da área onde, desde 1970, foram incorporados ao solo insumos como corretores e adubos. O presente experimento foi desenvolvido em uma área com histórico de aplicação de corretivos do solo e adubação de muitos anos, pelo que pode inferir-se similar conclusão.

Utilizando a informação contida na Tabela 14 calculou-se o total de sólidos dissolvidos (TDS) como a soma aritmética da concentração média dos íons presentes nas amostras, expressa em mg L^{-1} . No T_1 , TDS foi de $85,6 \text{ mg L}^{-1}$ (TDS máximo $309,6$ e TDS mínimo $26,6$), no T_2 , TDS foi de $143,5 \text{ mg L}^{-1}$ (TDS máximo $675,3$ e TDS mínimo $27,5$) e, para T_3 , TDS foi de $90,5 \text{ mg L}^{-1}$ (TDS máximo $435,3$ e TDS mínimo $25,1$). Comprovou-se que o TDS foi significativamente superior no tratamento fertilizado com 100 kg ha^{-1} de N (T_2) que na testemunha (teste LSD; $P < 0,1$). O T_3 ficou numa situação intermediária não diferenciando de T_1 e T_2 .

A porcentagem do nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), calculado pela soma de nitrito, nitrato e amônio em relação ao total de sólidos dissolvidos (TDS), foi no T_1 de $5,9\%$, no T_2 de $21,1\%$ e $23,3\%$ para T_3 . O acréscimo na contribuição das direntes espécies iônicas contendo nitrogênio foi significativo (teste LSD; $P < 0,1$) e reflete a influência da adubação nitrogenada na solução presente no solo a $0,9 \text{ m}$ de profundidade. Ora, a causa da alteração na quantidade de NID foi devida principalmente ao acréscimo na concentração do NO_3^- . Este fato foi comprovado ao observar que a contribuição percentual do NO_3^- no total de ânions calculada em base molar foi significativamente superior nos tratamentos fertilizados (Tabela 14).

Dentre as espécies aniônicas avaliadas utilizando o percentual de ânions ou de cátions calculado em base molar (%), observou-se predominância do Cl^- e a importante contribuição do HCO_3^- para os ânions (Tabela 14). Contabilizando cloreto, bicarbonato e nitrato, eles representam aproximadamente 90% dos ânions da solução no solo. Embora no tratamento sem fertilizante a porcentagem de nitrato foi baixa, quando o NO_3^- aumentou nos tratamentos fertilizados, ou Cl^- ou HCO_3^- diminuíram. Diferente do NO_3^- que aumentou nos tratamentos fertilizados, o ânion SO_4^{2-} não apresentou comportamento definido, sendo que o conteúdo de sulfato em T_2 inferior que em T_1 e T_3 . Fosfato e fluoreto geralmente são componentes minoritários da solução no solo (WOLT, 1994; SCHWAB, 2000) e, logicamente, apareceram em baixa proporção dentre os ânions avaliados. Outro motivo que influenciou a concentração de fosfato na solução foi o baixo teor de fósforo do solo, segundo classificação de teores de P para o estado de São Paulo

(MALAVOLTA, 2006) (Tabela 1). Além disso o fósforo foi medido como o ânion PO_4^{3-} , sendo que a forma química predominante no pH medido na solução extraída do solo deveria ser o H_2PO_4^- (BRADY; WEIL, 1999b).

Quanto aos cátions, observou-se predomínio do Ca^{2+} seguido do K^+ e Mg^{2+} quando comparados em base molar. Somando as participações de Ca^{2+} e K^+ , representaram aproximadamente 70% dos cátions avaliados. O comportamento do NH_4^+ não foi dependente da fertilização, como no caso do nitrato, sendo sua contribuição baixa. O baixo teor de sódio no solo (Tabela 1) explica, em parte, a baixa concentração do cátion na solução no solo a 0,9 m de profundidade.

Finalmente, destaca-se que os ânions Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} e os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (nessa ordem) são considerados como majoritários na solução no solo, mas a proporção depende de vários fatores como pH, condições de oxidação, redução, atividade microbiana dentre outros. Além do mencionado, em ambientes contaminados a composição da solução no solo pode mudar, refletindo a composição dos componentes mais solúveis dos contaminantes (SCHWAB, 2000), como aconteceu para N na solução no solo a 0,9 m de profundidade no presente experimento.

A concentração de íons teve grande variação no tempo em que se fez o monitoramento (Figura 24, Figura 25 e Figura 26). É interessante observar como a concentração de alguns elementos aumentou em um período bem definido, mesmo no T_1 no qual não se aplicou fertilizante, fato que indica que íons que estão geoquimicamente disponíveis na superfície do solo são transportados a camadas mais profundas. A variação temporal da concentração dos íons avaliados mostrou que houve aumento na concentração, principalmente de Cl^- , NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} , coincidentemente com o período de maior precipitação pluvial, quando aumentou a drenagem a 0,9 m de profundidade como se analisará posteriormente.

Tabela 14 - Concentração média (C, mg L⁻¹), Concentração mínima média (C_{Mín}, mg L⁻¹), Concentração máxima média (C_{Máx}, mg L⁻¹). Percentual de ânions e cátions (%) presentes na solução do solo calculados em base molar. Percentual de ânions e cátions em C_{Mín} e C_{Máx} (%_{Mín} e %_{Máx}) calculados em base molar

	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Tratamento 1: sem adubação de N e S												
C	11,6	0,2	22,8	0,2	3,9	1,1	10,0	2,7	0,9	12,8	3,5	15,9
C _{Mín}	4,9	0,2	2,2	0,0	0,1	0,1	3,6	0,9	0,1	6,7	1,2	6,7
C _{Máx}	27,4	0,2	124,0	1,0	16,8	5,1	18,4	9,1	3,6	36,6	13,8	53,6
%	18,7ab	1,0a	62,5a	0,5ab	6,1b	1,1a	10,0a	11,4a	4,7a	30,6a	14,1a	39,2a
% _{Mín}	40,6	5,2	34,3	0,1	1,0	0,5	18,3	9,2	1,0	35,4	12,1	42,4
% _{Máx}	11,3	0,3	75,1	0,5	7,1	1,4	4,4	11,9	5,9	27,1	16,5	38,7
Tratamento 2: 100 kg ha ⁻¹ de N e 114 kg ha ⁻¹ de S												
C	9,3	0,2	45,0	0,2	28,9	1,1	4,0	2,2	1,2	17,4	7,5	26,5
C _{Mín}	4,3	0,1	2,3	0,0	4,9	0,0	1,6	1,0	0,1	4,2	1,4	7,6
C _{Máx}	24,3	0,2	204,6	0,6	181,5	8,9	11,6	7,0	5,9	65,5	58,2	107,1
%	9,8b	0,5a	62,3a	0,3b	23,7a	0,7a	2,7b	6,7b	4,5a	29,3a	18,2a	41,4a
% _{Mín}	27,7	2,6	33,5	0,2	29,1	0,1	6,8	11,3	1,1	24,8	14,6	48,2
% _{Máx}	6,8	0,2	59,6	0,2	29,9	1,2	2,1	5,8	5,4	26,7	25,5	36,6
Tratamento 3: 150 kg ha ⁻¹ de N e 172 kg ha ⁻¹ de S												
C	12,4	0,2	11,9	0,3	19,9	0,9	10,0	2,4	1,0	11,0	3,6	17,0
C _{Mín}	5,9	0,1	0,9	0,0	1,4	0,1	2,4	0,9	0,2	3,8	1,4	8,1
C _{Máx}	33,8	0,2	92,2	1,1	142,9	7,2	23,6	7,9	3,2	35,9	19,6	67,8
%	24,1a	1,1a	32,5b	0,6a	31,2a	1,2a	9,1a	11,5a	5,8a	25,4a	14,6a	42,7a
% _{Mín}	54,3	4,0	14,7	0,1	13,7	0,4	12,8	9,8	2,3	21,0	15,7	51,2
% _{Máx}	13,7	0,3	45,3	0,6	32,7	2,5	4,9	10,3	4,8	26,7	18,1	40,2

Valores médios seguidos da mesma letra em cada coluna não são significativamente diferentes (teste LSD; P < 0,1).

Figura 24 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 25 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 26 - Concentração de ânions e cátions da solução no solo no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

2.3.4 Concentração de nitrogênio e enxofre da solução no solo

A concentração média de N mineral foi de 1,52 mg L⁻¹ no T₁, 7,49 mg L⁻¹ no T₂ e 5,28 mg L⁻¹ no T₃, estando compreendidos em um intervalo de valores máximos médios de 5,79; 41,55 e 33,18 mg L⁻¹ de N e de valores mínimos médios de 0,31; 1,70 e 0,80 mg L⁻¹ de N para T₁, T₂ e T₃,

respectivamente. Como será visto em alguns casos, as curvas da concentração de N com o tempo apresentaram uma considerável variabilidade entre parcelas do mesmo tratamento, o que posteriormente dificultou a interpretação dos resultados.

A concentração de N manteve-se baixa, sem uma variação importante em todo o período de monitoramento na testemunha (T_1) (Figura 27). Já nos tratamentos em que se aplicou sulfato de amônio, o intervalo de valores máximos e mínimos médios foi maior que no tratamento não fertilizado e registraram-se picos de concentração de N. Será visto posteriormente que os valores máximos de concentração de N tiveram grande influência na quantidade de N lixiviado e foram registrados no período de maior precipitação.

Figura 27 - Concentração de nitrogênio da solução no solo nos meses de monitoramento no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

A Figura 28 mostra a concentração de nitrogênio da solução no solo proveniente do solo (NSSPS) e do fertilizante (NSSPF). Pode-se observar o acréscimo da concentração de nitrogênio à profundidade de 0,9 m quando foram aplicados 100 kg ha^{-1} de N enriquecido com ^{15}N (2,15 %At de ^{15}N), comportamento mais evidente nos Blocos II, III e IV. Como se relatou no item 2.2.5.1, nos extratores do tratamento 1 localizados nos Blocos II, III e IV (Figura 3, extratores: 6, 9 e 10,) foi possível extrair maior número de amostras de solução do solo que no extrator

instalado no Bloco I (extrator 1, Figura 3). A abundância de ^{15}N foi superior à abundância natural do isótopo nos períodos em que se produziram os picos de concentração de N mineral, diminuindo posteriormente até o final do ciclo. Ao terem sido registrados os acréscimos de concentração do N proveniente do fertilizante, pode-se inferir que não houve fluxo lateral do nitrogênio e que o fluxo de água predominante foi no sentido vertical.

A abundância média do isótopo de nitrogênio marcado de todas as amostras analisadas nas quatro repetições foi de 0,99 %At. Considerando que o fertilizante continha 2,15 %At e a abundância natural de ^{15}N no solo foi 0,367 %At, a percentagem média de nitrogênio na solução do solo proveniente do fertilizante foi 34,9 % (%NSSPF, eq. 7). A %At foi superior à medida no ciclo de cana-planta (0,4296) na qual se aplicou uréia enriquecida com 5,04 %At, o que resultou numa %NSSPF de 1,34 (GHIBERTO et al., 2009a).

No Tratamento 3, registraram-se aumentos na concentração de N somente nos Blocos II e IV (Figura 29). No entanto, nos Blocos I e III esse comportamento não foi evidente mesmo com a aplicação de 150 kg ha^{-1} de N. Analisando a concentração média de N nos Blocos I ($3,44 \text{ mg L}^{-1}$) e III ($1,57 \text{ mg L}^{-1}$) pode-se observar que foi similar à do tratamento em que não se aplicou fertilizante (T_1 , Figura 27) estando compreendida entre os valores extremos encontrados para esse tratamento (0,31 e $5,79 \text{ mg L}^{-1}$). Os resultados apresentados mostram a dificuldade de determinar este parâmetro devido à grande variabilidade espacial e temporal da concentração dos diferentes íons da solução no solo.

Figura 28 - Concentração de nitrogênio da solução no solo proveniente do solo (NSSPS) e do fertilizante (NSSPF) nos meses de monitoramento no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 29 - Concentração de nitrogênio da solução no solo no Tratamento 3 nos meses de monitoramento: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

A concentração média de enxofre durante as avaliações foi de 3,35 mg L⁻¹ no T₁, 1,31 mg L⁻¹ no T₂ e 3,33 mg L⁻¹ no T₃, enquanto que os valores máximos médios foram 3,88; 6,14 e 7,86 mg L⁻¹ de S e os valores mínimos médios 1,21; 0,49 e 0,80 mg L⁻¹ de S para T₁, T₂ e T₃, respectivamente. No caso do enxofre, mesmo nos tratamentos fertilizados com sulfato de amônio nas quantidades de 114 e 172 kg ha⁻¹ de S, não se encontrou uma etapa bem definida na qual a concentração do S aumentase como no caso do N (Figura 30; Figura 31; Figura 32).

A abundância média do isótopo de enxofre marcado (³⁴S) de todas as amostras analisadas nas quatro repetições foi de 5,476 %At. A percentagem de enxofre da solução no solo proveniente do fertilizante média de todas as amostras foi de 19,24 (%SSSPF, eq. 7) sendo a %At ³⁴S do fertilizante 10,5% e do solo 4,28%. Na Figura 31 observa-se que principalmente no Bloco I a quantidade do enxofre proveniente do fertilizante foi maior logo após de aplicado o sulfato de amônio, permanecendo baixa no resto do ciclo monitorado.

Figura 30 - Concentração de enxofre da solução no solo nos meses de monitoramento no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 31 - Concentração de enxofre da solução no solo proveniente do solo (SSSPS) e do fertilizante (SSSPF) no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 32 - Concentração de enxofre da solução no solo no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

2.3.5 Lixiviação de macronutrientes

Utilizando a informação de fluxo diário de água e as concentrações das diferentes espécies iônicas estimou-se a quantidade lixiviada de N, S, P, Na, K, Ca, Mg e dos íons cloreto e bicarbonato. Em primeiro lugar, apresenta-se a lixiviação de nitrogênio de cada espécie iônica, a do enxofre proveniente do ânion sulfato e a quantidade de N e S lixiviado proveniente do fertilizante (Tabela 15, Tabela 16, Tabela 17 e Figura 33) e a seguir, a quantidade de cada macronutriente lixiviado (Tabela 18, Tabela 19, Tabela 20).

Para facilitar a interpretação dos resultados, avaliou-se a informação por períodos sendo estes iguais aos utilizados no balanço hídrico da cultura.

Segundo a informação gerada, o N movimentou-se principalmente como NO_3^- , devido à sua elevada solubilidade e ao predomínio de cargas negativas no solo (Figura 33), evidenciado pelo ΔpH negativo e pela carga líquida do solo (Tabela 1, Tabela 4). Como o nitrito é um produto intermediário da nitrificação e é oxidado rapidamente a NO_3^- (GROFFMAN, 2000; HALVIN et al., 2005), sua lixiviação foi reduzida. Por outro lado, a pouca quantidade de NH_4^+ transportado no T₂ e T₃, poderia ser explicada pela forte afinidade por minerais de argila e matéria orgânica carregados negativamente, sendo menos móvel que o NO_3^- . Renck e Lehmann (2004) e Salcedo e

Sampaio (1984) explicaram a baixa quantidade de amônio lixiviado em profundidade pela rápida velocidade de nitrificação em solos tropicais e pela elevada mobilidade do ânion nitrato. Ora, no T_1 em que a quantidade lixiviada de N foi baixa, aconteceu principalmente na forma de amônio como observado também em experimento de características similares (GHIBERTO et al., 2009b).

Comparando o aporte à lixiviação de cada espécie iônica de N entre tratamentos, a quantidade de N lixiviada proveniente do nitrato foi significativamente maior no T_2 (teste LSD, $P < 0,1$). Não foram encontradas diferenças estatísticas entre tratamentos para nitrito nem para amônio. Destaca-se que a proporção de amônio comparada com nitrito e nitrato foi maior no T_1 , quando não se aplicou fertilizante (Figura 33). No geral, o N total comportou-se de maneira semelhante ao nitrato. Os resultados mostraram que a quantidade média de N lixiviado foi consistente com a quantidade de N fertilizante aplicado em cada tratamento, mas o desvio-padrão propagado, tanto nas diferentes espécies iônicas contendo nitrogênio, como no N total e o N proveniente do fertilizante, mostrou a grande variabilidade na medida do processo de lixiviação no solo e a incerteza das observações.

A água e os solutos não foram deslocados uniformemente no perfil do solo, comportamento amplamente citado (NIELSEN; BIGGAR; WIERENGA, 1982), evidenciado pela variabilidade nos diferentes períodos para fluxo de água e de solutos. A origem desta variabilidade reside principalmente na relação exponencial entre a condutividade hidráulica e o conteúdo de água medido a 0,9 m de profundidade (Figura 18, eq. 2) e na estimativa do gradiente de potencial total (Figura 22, eq. 5). Observa-se que o desvio-padrão na determinação diária de θ não foi elevado (Figura 18), mostrando comportamento semelhante nas quatro repetições de cada tratamento, mas pequenas variações de θ numa relação exponencial com K induziram a importantes variações na estimativa da condutividade hidráulica, erro que se propagou posteriormente na estimativa do fluxo diário de água e, portanto, na determinação do fluxo dos diferentes íons.

Tabela 15 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 1. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m

Período		Lixiviação de N e S (kg ha ⁻¹)			
Nº	Data	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	S-SO ₄ ²⁻
1	16/11	-0,034 (0,069)	-0,979 (0,652)	-0,234 (0,261)	-1,622 (1,542)
2	17/11 - 6/12	-0,003 (0,007)	-0,184 (0,050)	-0,162 (0,080)	-0,459 (0,434)
3	7/12 - 18/12	0,000 (0,000)	-0,090 (0,101)	-0,135 (0,046)	-0,530 (0,592)
4	19/12 - 19/1	-0,000 (0,000)	-0,140 (0,075)	-0,726 (0,433)	-2,344 (1,037)
5	20/1 - 8/2	-0,010 (0,011)	-0,114 (0,067)	-0,240 (0,162)	-1,183 (0,581)
6	9/2 - 2/3	-0,005 (0,008)	-0,073 (0,046)	-0,208 (0,204)	-0,807 (0,639)
7	3/3 - 23/3	-0,015 (0,015)	-0,059 (0,060)	-0,149 (0,139)	-0,461 (0,454)
8	24/3 - 20/4	-0,004 (0,006)	-0,180 (0,266)	-0,079 (0,070)	-0,478 (0,480)
9	21/4 - 25/5	0,002 (0,004)	0,067 (0,174)	0,009 (0,053)	0,014 (0,423)
10	26/5 - 21/6	-0,006 (0,005)	-0,102 (0,164)	-0,060 (0,053)	-0,464 (0,286)
11	22/6 - 9/7	-0,001 (0,002)	0,004 (0,016)	-0,003 (0,007)	-0,045 (0,072)
Total		-0,076 (0,073)	-1,850 (0,763)	-1,987 (0,601)	-8,419 (2,332)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 1: sem adubação de N e S nos ciclos de cana-planta e primeira soca.

Tabela 16 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 2. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m

Período		Lixiviação de N e S (kg ha ⁻¹)					
Nº	Data	N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	¹⁵ N-Fert.	S-SO ₄ ²⁻	³⁴ S-Fert.
1	16/11	-0,012 (0,021)	-1,595 (1,015)	-0,436 (0,483)	-0,492 (0,830)	-1,242 (1,453)	-0,166 (0,135)
2	17/11 - 6/12	0,000 (0,000)	-0,556 (0,955)	-0,382 (0,709)	-0,677 (1,413)	-0,106 (0,183)	-0,033 (0,053)
3	7/12 - 18/12	0,000 (0,000)	-1,997 (1,408)	-0,247 (0,203)	-1,464 (1,639)	-0,228 (0,219)	-0,024 (0,013)
4	19/12 - 19/1	-0,018 (0,027)	-22,171 (17,414)	-0,821 (0,506)	-16,809 (13,988)	-1,252 (1,571)	-0,118 (0,058)
5	20/1 - 8/2	-0,004 (0,005)	-2,512 (3,892)	-0,288 (0,217)	-1,877 (3,048)	-0,627 (0,992)	-0,049 (0,035)
6	9/2 - 2/3	0,000 (0,006)	-0,982 (1,587)	-0,133 (0,147)	-0,655 (1,107)	-0,386 (0,771)	-0,027 (0,036)
7	3/3 - 23/3	-0,005 (0,004)	-0,991 (1,132)	-0,115 (0,081)	-0,364 (0,536)	-0,257 (0,322)	-0,023 (0,014)
8	24/3 - 20/4	0,003 (0,014)	-0,456 (0,359)	-0,073 (0,059)	-0,104 (0,121)	-0,114 (0,137)	-0,013 (0,015)
9	21/4 - 25/5	0,052 (0,117)	-0,289 (0,282)	-0,060 (0,103)	-0,019 (0,015)	-0,186 (0,263)	-0,012 (0,020)
10	26/5 - 21/6	-0,003 (0,003)	-0,247 (0,167)	-0,039 (0,036)	-0,053 (0,038)	-0,152 (0,234)	-0,012 (0,009)
11	22/6 - 9/7	-0,003 (0,002)	-0,039 (0,050)	-0,012 (0,012)	-0,009 (0,011)	-0,039 (0,042)	-0,003 (0,003)
Total		0,010 (0,123)	-31,835 (18,065)	-2,606 (1,060)	-22,523 (14,555)	-4,589 (2,547)	-0,480 (0,167)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 2: 80 kg ha⁻¹ de N no ciclo de cana-planta e, na primeira soca, 100 kg ha⁻¹ de N e 114 kg ha⁻¹ de S.

Tabela 17 - Lixiviação de nitrogênio e de enxofre no solo em diferentes períodos no Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de N ou S na profundidade de 0,9 m

Nº	Período Data	Lixiviação de N e S (kg ha ⁻¹)			
		N-NO ₂ ⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	S-SO ₄ ²⁻
1	16/11	-0,009 (0,012)	-0,407 (0,415)	-0,022 (0,046)	-0,679 (0,648)
2	17/11 - 6/12	0,001 (0,004)	-0,185 (0,164)	0,014 (0,040)	-0,060 (0,108)
3	7/12 - 18/12	-0,004 (0,007)	-0,479 (0,370)	-0,106 (0,069)	-0,208 (0,074)
4	19/12 - 19/1	-0,011 (0,004)	-17,167 (27,371)	-0,692 (0,528)	-1,209 (1,184)
5	20/1 - 8/2	-0,016 (0,007)	-0,799 (0,662)	-0,157 (0,058)	-1,368 (2,079)
6	9/2 - 2/3	-0,003 (0,003)	-0,641 (0,566)	-0,140 (0,090)	-1,365 (2,272)
7	3/3 - 23/3	-0,001 (0,002)	-0,312 (0,198)	-0,094 (0,059)	-0,844 (1,355)
8	24/3 - 20/4	-0,004 (0,004)	-0,179 (0,110)	-0,064 (0,056)	-0,286 (0,223)
9	21/4 - 25/5	-0,000 (0,000)	0,002 (0,125)	-0,004 (0,018)	0,101 (0,444)
10	26/5 - 21/6	-0,003 (0,004)	-0,075 (0,091)	-0,030 (0,025)	-0,212 (0,113)
11	22/6 - 9/7	-0,000 (0,000)	-0,011 (0,042)	-0,004 (0,013)	0,033 (0,092)
Total		-0,050 (0,018)	-20,253 (27,392)	-1,299 (0,554)	-6,097 (3,664)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. Tratamento 3: 120 kg ha⁻¹ de N no ciclo de cana-planta e, na primeira soca, 150 kg ha⁻¹ de N e 172 kg ha⁻¹ de S.

Figura 33 - Proporção do nitrogênio lixiviado nas diferentes espécies iônicas: (a) Tratamento 1; (b) Tratamento 2 e, (c) Tratamento 3

Tabela 18 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 1. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m

Período		P	D/AC	Lixiviação de macronutrientes ^(†) (kg ha ⁻¹)					
Nº	Data	(mm)	(mm)	N	S	P	K	Ca	Mg
1	16/11	152	-40,5 (28,1)	-1,2 (0,8)	-1,6 (1,5)	-0,1 (0,1)	-4,2 (2,8)	-6,6 (5,3)	-1,4 (1,1)
2	17/11 - 6/12	85	-13,0 (5,2)	-0,3 (0,1)	-0,5 (0,4)	-0,0 (0,0)	-2,7 (1,5)	-2,8 (0,7)	-0,7 (0,3)
3	7/12 - 18/12	41	-17,1 (9,0)	-0,2 (0,1)	-0,5 (0,6)	-0,0 (0,0)	-3,6 (2,9)	-4,9 (2,4)	-1,3 (0,7)
4	19/12 - 19/1	481	-107,9 (43,4)	-0,9 (0,4)	-2,3 (1,0)	-0,2 (0,3)	-18,9 (10,8)	-40,2 (30,2)	-10,8 (8,0)
5	20/1 - 8/2	94	-38,0 (19,4)	-0,4 (0,2)	-1,2 (0,6)	-0,1 (0,0)	-2,5 (1,6)	-3,6 (2,1)	-0,6 (0,3)
6	9/2 - 2/3	154	-30,8 (30,8)	-0,3 (0,2)	-0,8 (0,6)	-0,0 (0,1)	-1,5 (1,0)	-3,0 (3,2)	-0,5 (0,5)
7	3/3 - 23/3	124	-19,3 (20,4)	-0,2 (0,2)	-0,5 (0,5)	-0,0 (0,1)	-0,9 (0,6)	-1,6 (1,8)	-0,3 (0,3)
8	24/3 - 20/4	23	-14,2 (11,9)	-0,3 (0,3)	-0,5 (0,5)	-0,0 (0,0)	-1,4 (1,9)	-1,2 (0,9)	-0,2 (0,2)
9	21/4 - 25/5	100	-2,1 (13,6)	0,1 (0,2)	0,0 (0,4)	0,0 (0,0)	0,3 (1,4)	-0,2 (1,1)	0,0 (0,2)
10	26/5 - 21/6	12	-15,3 (8,7)	-0,2 (0,2)	-0,5 (0,3)	-0,0 (0,0)	-1,0 (1,1)	-1,2 (0,7)	-0,2 (0,1)
11	22/6 - 9/7	-	-1,8 (2,5)	0,0 (0,0)	0,0 (0,1)	-0,0 (0,0)	-0,0 (0,2)	-0,1 (0,2)	-0,0 (0,0)
Total		1266	-300,0 (70,2)	-3,9 (1,1)	-8,4 (2,3)	-0,4 (0,3)	-36,4 (12,1)	-65,4 (31,1)	-16,0 (8,2)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. P: Precipitação pluvial, D: drenagem interna, AC: ascensão capilar. Tratamento 1: sem adubação de N e S nos ciclos de cana-planta e primeira soca. (†) No experimento foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de K₂O e P₂O₅; e 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico no ciclo de cana-planta e, 120 kg ha⁻¹ de K₂O na primeira soca.

Tabela 19 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 2. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m

Período		P	D/AC	Lixiviação de macronutrientes ^(†) (kg ha ⁻¹)					
Nº	Data	(mm)	(mm)	N	S	P	K	Ca	Mg
1	16/11	152	-47,9 (30,2)	-2,0 (1,1)	-1,2 (1,5)	-0,6 (1,1)	-6,6 (4,1)	-7,0 (4,4)	-1,1 (0,9)
2	17/11 - 6/12	85	-7,8 (15,1)	-0,9 (1,7)	-0,1 (0,2)	-0,0 (0,1)	-3,9 (7,3)	-1,6 (2,9)	-0,3 (0,6)
3	7/12 - 18/12	41	-18,0 (7,5)	-2,2 (1,6)	-0,2 (0,2)	-0,0 (0,0)	-7,0 (8,2)	-6,5 (7,4)	-2,0 (2,8)
4	19/12 - 19/1	481	-122,3 (65,4)	-23,0 (17,5)	-1,3 (1,6)	-0,3 (0,2)	-27,7 (20,4)	-88,3 (77,2)	-28,0 (23,8)
5	20/1 - 8/2	94	-58,7 (39,4)	-2,8 (4,0)	-0,6 (1,0)	-0,1 (0,1)	-2,9 (3,3)	-19,6 (29,1)	-5,5 (9,0)
6	9/2 - 2/3	154	-27,4 (29,0)	-1,1 (1,6)	-0,4 (0,8)	-0,0 (0,1)	-1,5 (1,9)	-6,1 (8,4)	-1,7 (2,6)
7	3/3 - 23/3	124	-25,2 (10,8)	-1,1 (1,2)	-0,3 (0,3)	-0,1 (0,0)	-1,8 (0,9)	-4,9 (5,0)	-1,3 (1,7)
8	24/3 - 20/4	23	-13,8 (9,9)	-0,5 (0,4)	-0,1 (0,1)	-0,1 (0,1)	-0,7 (0,4)	-1,5 (0,8)	-0,3 (0,3)
9	21/4 - 25/5	100	-14,2 (19,6)	-0,3 (0,4)	-0,2 (0,3)	-0,0 (0,0)	-0,5 (1,8)	1,5 (6,4)	0,7 (1,8)
10	26/5 - 21/6	12	-12,7 (9,9)	-0,3 (0,2)	-0,2 (0,2)	-0,0 (0,0)	-0,8 (0,5)	-1,4 (1,1)	-0,3 (0,3)
11	22/6 - 9/7	-	-3,8 (3,5)	-0,1 (0,1)	-0,0 (0,0)	-0,0 (0,0)	-0,2 (0,2)	-0,3 (0,3)	-0,0 (0,1)
Total		1266	-351,8 (92,6)	-34,3 (18,3)	-4,6 (2,5)	-1,2 (1,2)	-53,6 (23,9)	-135,7 (83,8)	-39,8 (25,9)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. P: Precipitação pluvial, D: drenagem interna, AC: ascensão capilar. Tratamento 2: 80 kg ha⁻¹ de N no ciclo de planta e, na primeira soca, 100 kg ha⁻¹ de N e 114 kg ha⁻¹ de S. (†) No experimento foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de K₂O e P₂O₅; e 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico no ciclo de cana-planta e, 120 kg ha⁻¹ de K₂O na primeira soca.

Tabela 20 - Fluxo de água e lixiviação de macronutrientes de plantas no solo em diferentes períodos no Tratamento 3. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de água ou macronutrientes na profundidade de 0,9 m

Período		P	D/AC	Lixiviação de macronutrientes ^(†) (kg ha ⁻¹)					
Nº	Data	(mm)	(mm)	N	S	P	K	Ca	Mg
1	16/11	152	-20,8 (22,5)	-0,4 (0,5)	-0,7 (0,6)	-0,1 (0,1)	-2,1 (2,6)	-5,0 (6,6)	-0,5 (0,5)
2	17/11 - 6/12	85	-1,8 (3,6)	-0,2 (0,2)	-0,1 (0,1)	-0,0 (0,0)	-0,6 (0,7)	-0,4 (0,4)	-0,1 (0,1)
3	7/12 - 18/12	41	-11,7 (4,9)	-0,6 (0,3)	-0,2 (0,1)	-0,0 (0,0)	-1,7 (1,1)	-2,2 (1,3)	-0,5 (0,3)
4	19/12 - 19/1	481	-75,6 (46,8)	-17,9 (27,8)	-1,2 (1,2)	-0,1 (0,0)	-14,9 (18,4)	-36,5 (41,9)	-9,9 (11,1)
5	20/1 - 8/2	94	-28,8 (9,2)	-1,0 (0,6)	-1,4 (2,1)	-0,1 (0,0)	-2,3 (2,8)	-3,8 (1,3)	-0,7 (0,2)
6	9/2 - 2/3	154	-23,4 (9,1)	-0,8 (0,6)	-1,4 (2,3)	-0,0 (0,0)	-2,6 (3,7)	-3,2 (2,3)	-0,6 (0,4)
7	3/3 - 23/3	124	-16,1 (8,5)	-0,4 (0,2)	-0,8 (1,4)	-0,0 (0,0)	-1,5 (2,1)	-2,1 (1,5)	-0,4 (0,3)
8	24/3 - 20/4	23	-9,9 (5,9)	-0,2 (0,1)	-0,3 (0,2)	-0,0 (0,0)	-0,5 (0,3)	-1,1 (0,5)	-0,2 (0,1)
9	21/4 - 25/5	100	-2,2 (6,0)	-0,0 (0,1)	0,1 (0,4)	-0,0 (0,0)	0,2 (0,7)	-0,0 (0,9)	-0,0 (0,2)
10	26/5 - 21/6	12	-7,7 (5,5)	-0,1 (0,1)	-0,2 (0,1)	-0,0 (0,0)	-0,3 (0,2)	-0,7 (0,4)	-0,1 (0,1)
11	22/6 - 9/7	-	-0,8 (2,3)	-0,0 (0,1)	0,0 (0,1)	-0,0 (0,0)	0,0 (0,2)	-0,0 (0,2)	-0,0 (0,0)
Total		1266	-198,8(55,5)	-21,6(27,795)	-6,2 (3,7)	-0,3 (0,1)	-26,3 (19,3)	-55,0 (42,6)	-13,0(11,1)

O valor que aparece para cada período é a média das quatro repetições e respectivo desvio-padrão e o que aparece para o total do ciclo é o somatório de cada período e respectivo desvio-padrão propagado. P: Precipitação pluvial, D: drenagem interna, AC: ascensão capilar. Tratamento 3: 120 kg ha⁻¹ de N no ciclo de planta e, na primeira soca, 150 kg ha⁻¹ de N e 172 kg ha⁻¹ de S. (†) No experimento foram aplicados 120 kg ha⁻¹ de K₂O e P₂O₅; e 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico no ciclo de cana-planta e, 120 kg ha⁻¹ de K₂O na primeira soca.

A quantidade de N lixiviado tanto nativo como proveniente do fertilizante foi elevada no tratamento fertilizado com 100 kg ha⁻¹ de N e significativamente superior que o tratamento não fertilizado (Anexo A). Outros trabalhos, utilizando tensiômetros e extratores de solução do solo entre 0,8 e 1,20 m de profundidade e doses superiores a 100 kg ha⁻¹ de N, mostram perdas entre 15 e 21 kg ha⁻¹ de N na cultura de milho num Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Typic Hapludox) (FERNANDES; LIBARDI; CARVALHO, 2006), 15 kg ha⁻¹ de N em feijão em uma “Terra Roxa Estruturada” (Oxic Paleudalf) (MEIRELLES; LIBARDI; REICHARDT, 1980), 28,2 kg ha⁻¹ de N na terceira soca em cana-de-açúcar (CAMARGO, 1989) e um máximo de 76 kg ha⁻¹ de N em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (Typic Hapludox) também com cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al., 2001). Exceto para Camargo (1989), em todos os casos, a drenagem de água na profundidade de controle foi maior que 200 mm, como aconteceu neste experimento. Esses trabalhos foram desenvolvidos no Estado de São Paulo (Brasil) em clima com excedentes hídricos anuais de similar magnitude à de Jaboticabal, evidenciando que nesse local podem acontecer perdas importantes de N, se as condições climáticas favorecerem a drenagem e o nitrogênio estiver disponível.

Apesar da elevada perda por lixiviação de N observada, Ghiberto et al. (2009a) estudando

a lixiviação de N no ciclo de cana-planta em um Latossolo Vermelho Amarelo (Typic Eutruxox) aplicaram 120 kg ha^{-1} de uréia- ^{15}N e encontraram perdas por lixiviação de $1,1 \text{ kg ha}^{-1}$ com $0,054 \text{ kg ha}^{-1}$ provenientes do fertilizante, sendo a drenagem no ciclo de 91 mm. Também Oliveira et al. (2000), em estudo de campo não encontraram quantidades importantes de N lixiviado a 1,0 m de profundidade em uma “Terra Roxa Estruturada” (Rodic Kandiuđalf). Nesse caso, a dose de N foi menor (63 kg ha^{-1} de $\text{N}-(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) e a eficiência de uso do N-fertilizante (60%) superior à encontrada no presente e em outros experimentos (CHAPMAN; HAYSOM; SAFFIGNA, 1994; TRIVELIN; VICTORIA; RODRIGUES, 1995; VALLIS et al., 1996). Usando vasos de 220 L com o sistema radicular confinado a um volume não representativo do que ocorre em campo, Trivelin et al. (2002a) e Oliveira et al. (2002) mostraram que o total de N lixiviado foi $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$, nada advindo do fertilizante (uréia), 53% dos quais ocorreram nas primeiras três semanas devido ao escasso desenvolvimento do sistema radicular da cultura e maior precipitação pluvial. Também Bologna-Campbell (2007) atribuiu às mesmas causas, quando, usando fertilizante marcado com ^{15}N e ^{34}S , quantificou perdas de N e S por lixiviação.

É possível que esse contraste nos resultados seja porque a lixiviação de N é um processo complexo, afetado por diferentes fatores como dose e solubilidade do fertilizante (EL WALI; LE GRAND; GASCHO, 1980; WANG; ALVA, 1996), eficiência de uso do nitrogênio pela cultura, capacidade de armazenagem e transmissão de água no solo (PORTER, 1995) e quantidade de N mineralizado (THORBURN et al., 2003b). Por tal motivo os resultados devem ser estudados com cuidado, levando em consideração a grande variabilidade que se obtém em experimentos de campo deste tipo, o que, como mencionou Wong et al. (1992), mascara os efeitos dos tratamentos. Como exemplo, no tratamento 3, a concentração de N da solução no solo (Figura 29) e a drenagem estiveram compreendidas em um amplo intervalo de valores (Tabela 12) dificultando a interpretação dos resultados.

Quanto à disponibilidade do nitrogênio para ser lixiviado, observou-se que a fertilização com N teve efeito na concentração da solução no solo a 0,9 m de profundidade. Destaca-se que a concentração média de N da solução no solo não superou os 10 mg L^{-1} , limite máximo aceitável para consumo humano, mas os valores máximos atingidos no T_2 ($41,55 \text{ mg L}^{-1}$) e T_3 ($33,18 \text{ mg L}^{-1}$) foram superiores ao valor mencionado. Oliveira et al. (2001) registraram um acréscimo de 0,74 a $14,58 \text{ mg L}^{-1}$ na concentração média de N-NO_3^- na solução no solo a 0,9 m de profundidade, quando aplicados 0 e 120 kg ha^{-1} de N em cana-de-açúcar, respectivamente, resultando em

elevada perda por lixiviação. Como mostraram os resultados, a combinação de elevada concentração de N e drenagem no período 4 foram responsáveis pela maior parte das perdas de N por lixiviação. O contrário aconteceu no experimento conduzido no ciclo agrícola de cana-planta em Pirassununga (GHIBERTO et al., 2009b) no qual a baixa concentração de N da solução no solo a 0,9 m de profundidade foi uma das causas da baixa perda por lixiviação.

Os resultados indicaram, também, que devem ser consideradas tanto a quantidade como a distribuição diária das chuvas durante o período de excedentes hídricos (dezembro a março). Eventos individuais de precipitação elevada (Figura 23), quando o perfil de solo estava perto da capacidade de campo (Figura 16; Figura 18), provocaram os valores mais altos de drenagem do ciclo mostrando que se o N estiver disponível, em solo com predomínio de cargas negativas, com baixa capacidade de adsorção de nitrato (ver ΔpH em Tabela 1) e condutividade hidráulica de moderada a alta, o N pode ser facilmente perdido por lixiviação em curtos períodos de tempo.

No ciclo agrícola de cana-planta a este experimento também foi observado esse comportamento. Os períodos de maior drenagem ocorreram quando o conteúdo de água volumétrico superou o valor da capacidade de campo a 0,9 m de profundidade e coincidiram com os meses de maior pluviosidade. No ciclo agrícola de cana-planta foram aplicados 120 kg ha^{-1} de N na forma de uréia- ^{15}N e as perdas por lixiviação de N a 0,9 m de profundidade, foram 18 kg ha^{-1} principalmente na forma de nitrato, com 25 g provenientes do fertilizante (GHIBERTO et al., 2009a). A quantidade total de água drenada no ciclo foi de 206 mm, sendo essa quantidade 141 mm a menos que o excedente calculado usando o balanço hídrico climatológico pelo método Thornthwaite e Matter (1955) segundo (SENTELHAS et al., 2009). Também nesses períodos ocorreram as maiores perdas de íons abaixo da profundidade de 0,9 m.

Já no ciclo agrícola de cana-soca (presente experimento), a precipitação pluvial foi maior que na cana-planta e em janeiro foi maior que a média histórica (Figura 15), como foi apresentado no item 2.3.2.1. Em consequência, originaram-se condições favoráveis para a drenagem que junto com a disponibilidade de N favoreceram a lixiviação. No tratamento 2, mesmo com menor quantidade de fertilizante aplicado (100 kg ha^{-1} de N) que na cana-planta, a quantidade lixiviada de N foi maior coincidentemente com a drenagem (206 mm em cana-planta contra 352 mm na soca). No T_3 a quantidade drenada de água e o N lixiviado foram semelhantes ao ciclo de cana-planta.

Os resultados obtidos no ciclo de cana-planta (2005/2006) e na primeira soca (2006/2007) em Jaboticabal (SP) contrastam com os obtidos em Pirassununga (SP) no ciclo agrícola de cana-planta (2005/2006) por Ghiberto et al. (2009b), onde em solo da mesma classe textural, verificaram que somente $1,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de N foram lixiviados, com 54 g provenientes do fertilizante. A principal diferença observada entre os experimentos foi a quantidade e distribuição das chuvas durante o período de excedentes hídricos, sendo a precipitação pluvial no período de monitoramento em Pirassununga menor que o normal, principalmente no mês mais chuvoso (janeiro). Poss e Saragoni (1992) também encontraram que a lixiviação de nitrato dependeu da distribuição das chuvas na cultura de milho em um Latossolo (Typic Eutrutox). Nesse experimento, aplicaram 120 kg ha^{-1} de N-uréia e mediram o fluxo de água e N utilizando tensiômetros e extratores de solução do solo com cápsulas porosas. Os autores registraram 21 kg ha^{-1} de N lixiviados na primeira estação de crescimento (abril a julho), com 377 mm de chuva distribuídas em vários eventos e, na segunda estação, com somente 308 mm distribuídos em poucas chuvas intensas, mediram 95 kg ha^{-1} de N.

Considerando a baixa perda de N por lixiviação encontrada por Oliveira et al. (2000) com elevado aproveitamento do N-fertilizante (60%) e as maiores perdas por lixiviação encontradas por Camargo (1989) com baixa eficiência no uso do N-fertilizante (14,4%), pode-se inferir que a demanda do nutriente pela planta também tem influência na quantidade de N lixiviado. Relacionado às perdas por lixiviação/denitrificação em cana-de-açúcar, Prasertsak et al. (2002) sugerem que poderiam ser reduzidas fazendo coincidir a demanda da cultura com o suprimento de N, fato também mencionado por outros autores (NG KWONG; DEVILLE, 1987; CHAPMAN; HAYSOM; SAFFIGNA, 1994; McNEILL et al., 2005).

Neste caso, observou-se que a demanda de N pela cana-de-açúcar não foi suficiente para impedir perdas por lixiviação devido à elevada drenagem e disponibilidade de N em períodos curtos em relação ao ciclo agrícola da cultura. A afirmativa se confirma ao observar que no T₃, em 31 dias (período 4, Tabela 20) foram lixiviados $17,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N quando, no mesmo período, a cana produziu, no mesmo tratamento, $4,349 \text{ Mg ha}^{-1}$ de fitomassa aérea seca e demandou somente $6,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (OLIVEIRA et al., 2009). Cabe lembrar que o período 4 correspondeu à fase de crescimento máximo da cultura (FARONI, 2008) com elevada demanda de água nos três tratamentos, como mostraram os dados de evapotranspiração apresentados (Tabela 10, Tabela 11, Tabela 12). Utilizando a informação de Oliveira et al. (2009), verificou-se que no presente

experimento a cana-de-açúcar fertilizada com 150 kg ha^{-1} de N teve uma produção de $31,319 \text{ Mg ha}^{-1}$ de fitomassa aérea seca contendo $112,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, mostrando que o aporte de fertilizante foi maior que a demanda da cultura, aumentando o risco potencial de perda por lixiviação.

Em contraste com os resultados relatados, em outro estudo a drenagem não foi elevada na fase de crescimento máximo da cultura e como a era elevada a demanda por água e nutrientes, a extração foi suficiente para evitar perdas excessivas de N (GHIBERTO et. al., 2009b). Nesse experimento, a partir dos dados de Franco et al. (2008), verificou-se que foram acumulados $5,047$ e $4,461 \text{ Mg ha}^{-1}$ de fitomassa seca nos dois períodos de maior perda de N por lixiviação, e que a evapotranspiração real média desses períodos foram de 11 e 8 mm d^{-1} (BRITO; LIBARDI; GHIBERTO, 2009), comprovando que a demanda de N e água foi elevada. No mesmo sentido, Stewart et al. (2006), utilizando o modelo de simulação APSIM-SWIM, mostraram que dos $29,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-NO_3^- transportados na fase de drenagem, a cana-de-açúcar absorveu $26,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-NO_3^- do solo abaixo da profundidade de $1,5 \text{ m}$; subtraindo essa quantidade da perdida por drenagem, verificaram que a perda líquida por lixiviação foi de $2,9 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-NO_3^- o que atenuaria os problemas de poluição do lençol freático.

O risco de perdas de N aumenta quando a dose aplicada é maior que o requerimento da cana-de-açúcar (VERBURG et al., 1998; THORBURN et al., 2003a; MUCHOVEJ; NEWMAN, 2004), mesmo aumentando a recuperação do N-fertilizante com maior quantidade de adubo (FARONI, 2008). No Brasil, as doses de N aplicadas são semelhantes ou até menores que as quantidades de N exportadas pelos colmos (CANTARELLA; TRIVELIN; VITTI, 2007) sendo menores que as usadas em outros países como Austrália onde variam de 150 a 250 kg ha^{-1} de N (GOURLEY; RIDLEY, 2005; STEWART et al., 2006). Nesse sentido, um aumento na eficiência do uso de fertilizantes acarretaria benefícios do ponto de vista ambiental e pela diminuição dos custos para as empresas pelo menor uso de fertilizante nitrogenado (CHAPMAN; HAYSOM; SAFFIGNA, 1994).

Como se observou falta de sincronia entre a oferta de N e a demanda por parte da cultura, perdas por lixiviação poderiam ser diminuídas parcelando a aplicação de fertilizante. O efeito do parcelamento do fertilizante foi observado quando aplicando uma única dose no plantio ($60 \text{ kg de N ha}^{-1}$) a concentração de N mineral atingiu mais de 50 mg L^{-1} , quase o dobro (27 mg L^{-1}) que com o N aplicado duas parcelas de $20 \text{ kg de N ha}^{-1}$ no plantio + $40 \text{ kg de N ha}^{-1}$ 3 meses após

(SALCEDO; SAMPAIO; CARNEIRO, 1988). Segundo Salcedo e Sampaio (1984) a aplicação parcelada do fertilizante refletiu-se em menor lixiviação, mas não em maior produção de cana-de-açúcar. Em contraposição Ng Kee Kwong e Deville (1987) encontraram que aplicando 100 kg ha^{-1} de N na forma de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ perto da fase de crescimento máximo, a cana-de-açúcar aproveitou melhor o fertilizante, o N permaneceu na camada de 0 a 0,15 m e não se movimentou lateralmente a mais de 0,3 m. Embora tenham concluído que o movimento de N abaixo da zona radicular possa ser negligenciado, esse experimento foi conduzido em uma região de menor precipitação pluvial que em Jaboticabal e em solo argilo siltoso, diferente ao deste experimento.

Analizando a marcha de absorção de N pela cana-de-açúcar no T_3 com a informação de Oliveira et al. (2009), a parte aérea demandou $73,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N desde colheita da cana-planta até a fertilização da cana-soca em 1/11/2006. Desta data em diante, a demanda foi $39,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N até colheita (total demandado: $112,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N). Como o fertilizante foi aplicado em uma parcela em condições de conteúdo de água (Figura 17) e temperatura favoráveis (ver Anexo E, Figura 44) à nitrificação, é muito provável que o amônio tenha sido convertido rapidamente em nitrato ficando biodisponível para a planta e geoquimicamente disponível para ser lixiviado. Somado a isso, a precipitação pluvial mensal aumentou de outubro a janeiro (Figura 15) favorecendo a drenagem interna e o transporte por fluxo de massa do N, tanto nativo como proveniente do fertilizante. Considerando que a taxa diária de absorção de N foi máxima antes da data de aplicação do fertilizante decrescendo posteriormente, a demanda da cultura não foi suficiente para absorver a quantidade de N disponível como já foi mencionado.

Estas colocações explicariam também porque no ciclo de cana-planta uma baixa proporção do fertilizante foi lixiviada ao contrario da cana-soca na qual se registrou uma quantidade importante do N lixiviado proveniente do fertilizante no T_2 (Figura 28, Tabela 16).

No ciclo agrícola de cana-planta, segundo dados de Franco et al. (2007), nas operações de preparo para implantação da cana-de-açúcar, foram incorporados $29,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha contendo $196,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de N; 150 kg ha^{-1} de K; 20 kg ha^{-1} de P; 60 kg ha^{-1} de Ca; $24,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mg e $29,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de S com relação C/N de aproximadamente 100 e C/S superior a 200 (OLIVEIRA et al., 1999), aumentando a imobilização de N e S e diminuindo a quantidade de elementos potencialmente lixiviáveis (OLIVEIRA et al., 1999; McNEILL et al., 2005). Deve-se considerar que em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar sem queima os nutrientes adicionados ao solo

como resíduos orgânicos são liberados gradualmente, estando menos propensos à lixiviação, volatilização ou fixação (WOOD, 1991) ficando o agroecossistema mais conservativo e sustentável (BASANTA et al., 2003).

No ciclo de cana-planta, os resultados mostraram que a maior proporção do N perdido por lixiviação foi proveniente do solo. Elevadas quantidades de N mineralizado associadas às perdas de N foram encontradas por Thorburn et al. (2003b). No Brasil, estudos de incubação em laboratório com solo arenoso no ciclo de cana-planta, indicaram que importantes quantidades de N podem ser mineralizados anualmente (SALCEDO; SAMPAIO; ALVES, 1985), confirmando os resultados obtidos no ciclo de planta. Nesse experimento, o preparo do solo com aração profunda para incorporação dos resíduos vegetais pode ter favorecido o processo de mineralização, aumentando a liberação de íons potencialmente lixiviáveis.

Por outro lado, a imobilização e liberação lenta de nutrientes pela incorporação de resíduos com elevada proporção de carbono podem ter limitado o processo de mineralização e imobilizado o fertilizante marcado com ^{15}N . A baixa proporção de N-fertilizante lixiviada (25 g ha^{-1}) suporta a conclusão de Ng Kee Kwong e Deville (1987) que atribui esse comportamento à interferência da imobilização biológica do N no movimento descendente do fertilizante nitrogenado. Uma vez que a volatilização foi prevenida pela incorporação da uréia (PRASERTSAK et al, 2002) e a recuperação pela planta toda do N foi 21% no ciclo todo da cana-planta (FRANCO et al., 2008), é possível que o N do fertilizante tenha sido imobilizado na matéria orgânica ao mesmo tempo que o nitrogênio orgânico tenha sido mineralizado (JANSSON; PERSSON, 1982). Uma substancial imobilização do N do fertilizante foi encontrada recentemente por Meier et al. (2006).

Depois de um ano de reformado o canavial, já na primeira soca, a relação C/N/S deveria ser menor que no momento da incorporação de resíduos culturais como mostraram os trabalhos de Vitti, A.C. et al. (2008), Robertson e Thorburn (2007) e Vitti (1998) sendo, conseqüentemente, menos expressiva a imobilização do fertilizante aplicado. Além disso, como foi adicionada uma quantidade importante de amônio em condições favoráveis à atividade aeróbica de microorganismos nitrificadores (50 a 70% do espaço poroso ocupado por água e temperatura do solo entre 25 e 35°C segundo Brady e Weil, (1999a), o NH_4^+ do fertilizante teria sido rapidamente transformado em nitrato ficando suscetível a ser lixiviado. Nesse sentido, para

melhorar o aproveitamento de N pela cana-de-açúcar e diminuir as perdas por lixiviação/denitrificação foi sugerida a utilização de inibidores da nitrificação (PRASERTSAK et al., 2002; CHAPMAN; HAYSOM; SAFFIGNA, 1994). No tratamento 1, sem adubação, a quantidade de nitrato foi baixa e lixiviou principalmente amônio.

A partir da análise do isótopo ^{15}N na solução extraída do solo, pôde-se verificar que do total de N lixiviado no ciclo da cultura, $22,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N provieram do fertilizante nitrogenado aplicado (100 kg ha^{-1} de N). Faroni (2008) avaliou o destino do N fertilizante neste mesmo tratamento encontrando que dos 100 kg ha^{-1} de N aplicados, 36,1% foi recuperado pela cana-de-açúcar e 21,9% ficou no solo. Contudo, do total aplicado, $18,5 \text{ kg ha}^{-1}$ não foram contabilizados, podendo ter sido perdidos pela parte aérea das plantas, denitrificado ou volatilizado (TRIVELIN et al., 2002a). Como foi aplicado sulfato de amônio, as perdas por volatilização deveriam ser baixas, como relata Wood (1991). Desta forma deveriam ser mais importantes as perdas pela parte aérea da cana-de-açúcar e por denitrificação, mas não foram quantificadas. O nitrogênio na planta proveniente do fertilizante foi $36,09 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, dos quais, $16,67 \text{ kg ha}^{-1}$ de N estiveram concentrados nos colmos, $8,69 \text{ kg ha}^{-1}$ de N nas folhas secas, $9,44 \text{ kg ha}^{-1}$ de N nos ponteiros e $1,28 \text{ kg ha}^{-1}$ de N nas raízes (FARONI, 2008).

Pelos resultados apresentados por Faroni (2008), a cultura absorveu principalmente N nativo, e a baixa recuperação do N fertilizante neste ciclo pode ser atribuída às perdas por lixiviação do N. Em contraposição, outros estudos mostram que a baixa recuperação do N-fertilizante não foi originada por elevadas perdas por lixiviação (NG KEE KWONG; DEVILLE 1987; TRIVELIN et al., 2002a; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007; GHIBERTO et al., 2009a, entre outros). Esta aparente contradição advém de que os experimentos foram conduzidos com diferentes métodos e em diferentes condições agroecológicas, mostrando a complexidade que têm estudos deste tipo e a impossibilidade de se fazer generalizações.

Avaliando as perdas por lixiviação a 0,9 m de profundidade dos outros macronutrientes que não o nitrogênio, destaca-se a baixa perda de enxofre e fósforo em contraste com as de cálcio, magnésio e potássio (Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20).

Resultado semelhante obteve-se no ciclo agrícola de cana-planta (GHIBERTO et al., 2009a). Wong et al. (1992), encontraram um aumento das perdas de nitrato com aplicação de uréia associadas a elevadas perdas de Ca (312 kg ha^{-1} em duas estações) e de Mg em um

Argissolo (Typic Paleudult) com a fração argila dominada por caulinita, pequena quantidade de goetita e com baixa CTC. A baixa quantidade de K lixiviada encontrada nesse trabalho foi atribuída à maior afinidade do solo por esse cátion monovalente, devido ao baixo teor de K no complexo de troca catiônica. Similar interpretação foi dada por Paul, Ng Kwong e Deville (1998).

Além do fertilizante aplicado e do teor de cada elemento no solo, outra das possíveis fontes de elementos é a decomposição da palha tanto incorporada na reforma do canavial (FRANCO, 2007), como a remanescente da colheita sem queima da cana-planta. Oliveira et al. (1999) constataram, em condições climáticas semelhantes às deste experimento, que com 14 Mg ha⁻¹ de palhada aportados e não incorporados, a biomassa seca diminuiu 23 % depois de um ano, com liberação de quantidades estatisticamente significativas de K (85%), Ca (44%) e Mg (38%) e não de N, S e P. Também deve considerar-se, no caso do cloreto e do potássio, a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de K₂O tanto na cana-planta como na cana-soca, que representam 199 kg ha⁻¹ de K e 181 kg ha⁻¹ de Cl, fator que pode ter influenciado as perdas desses elementos.

A Figura 34 mostra os pontos experimentais da lixiviação acumulada de diferentes íons em estudo. Observou-se comportamento diferenciado dos íons Cl⁻, NO₃⁻, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ comparados com HCO₃⁻, PO₄³⁻, Na⁺ e NH₄⁺. O primeiro grupo corresponde aos íons que, no pico de máxima concentração, apresentaram a maior proporção na solução no solo calculada em base molar (Tabela 14). Estes foram deslocados mais rapidamente e em maior quantidade que os do segundo grupo.

Para avaliar os resultados pode-se fazer uma analogia com experimentos de deslocamento miscível em colunas de solo fazendo com que o fertilizante aplicado seja o pulso do soluto a ser estudado. Considerando que o volume de água móvel entre 0 e 0,9 m de profundidade no solo (V₀) está compreendido entre os conteúdos hídricos de saturação (parâmetro de ajuste da CR, Tabela 6) e capacidade de campo (considerada quando o fluxo de água era 0,1 mm d⁻¹), 1,0 volume de poro (V_p) correspondeu a 43 mm de água. Estimou-se que percolaram no perfil 7,0 V_p no T₁, 8,2 no T₂ e 4,6 no T₃. Calculado dessa forma, 1,0 V_p percolou no perfil no dia 16/11/2006 no T₁, no dia 10/11/2006 em T₂ e no dia 29/12/2006 no T₃, sempre antes se produzir o ponto de inflexão das curvas nos tratamentos fertilizados (Figura 34). O ponto de inflexão corresponderia à taxa de lixiviação máxima do soluto em questão e aconteceu aproximadamente no dia 8/1/2007

nos tratamentos fertilizados para cloreto, nitrato, potássio, magnésio e cálcio. Nessa data tinham passado pelo perfil do solo 3,5; 3,4 e 2,1 volumes de poro no T₁, T₂ e T₃, respectivamente.

A demora na aparição do pulso do fertilizante e os elementos acompanhantes foi evidenciada pelo deslocamento entre a data em que drenou 1,0 volume de poro e a data em que se produz o ponto de inflexão das curvas. Esse deslocamento é característico de elementos que quando são transportados tem reações no complexo de troca e são adsorvidos (SKAGGS; LEIJ, 2002). Nos tratamentos fertilizados, as curvas dos íons Cl^- , NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} mostram o comportamento mencionado e a maior mobilidade desses íons que a de fosfato e sulfato neste experimento.

Figura 34 - Lixiviação acumulada de ânions e cátions. Cada ponto experimental representa a média das quatro repetições nos diferentes tratamentos (continua)

Figura 34 - Lixiviação acumulada de ânions e cátions. Cada ponto experimental representa a média das quatro repetições nos diferentes tratamentos (conclusão)

Pelas quantidades de cloreto, nitrato, cálcio, potássio e magnésio lixiviadas, a retenção pelo solo desses íons não foi elevada. A baixa retenção dos cátions e ânions mencionados pode ser explicada porque o solo está altamente intemperizado, apresenta baixa capacidade de troca de cátions, com evidências de que a caulinita domina a fração mineral do solo sendo baixo o teor de óxidos de Fe (Tabela 2) (hipoférrico, segundo Embrapa (2006)). Como suporte desta afirmativa, Qafoku e Sumner (2001) estudaram a retenção de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ em solos de carga variável com diversas mineralogias e atributos químicos do solo verificaram mudanças na retenção de sais em função do pH e da força iônica da solução. Os autores encontraram que a magnitude da retenção do sal foi maior em solos com elevada capacidade de troca, tanto, de ânions como de cátions, assim como quando ambos, caulinita e óxidos de Fe/Al, dominavam a fração argila. No trabalho

apresentaram que a retenção poderia ser baixa em subsolos com predomínio de um tipo de mineral, dando exemplos de solos com 90 a 95% de caulinita e baixo conteúdo de óxidos de Fe/Al nos quais a retenção de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ foi baixa.

Não se deve desconsiderar o efeito que teriam provocado a aplicação de calcário e a adubação fosfatada na geração de carga líquida negativa (NAIDU et. al., 1990; QAFOKU; SUMNER, 2001) favorecendo a exclusão do nitrato e, portanto, a lixiviação de N de camadas superficiais. Em estudos em colunas de solo, Bellini et al. (1996) mostram que a aplicação de calcário originou a diminuição da capacidade de troca de ânions e que o Cl^- , NO_3^- e SO_4^{2-} apareceram rapidamente no lixiviado, indicando a liberação de ânions previamente retidos em sítios de troca. Também observaram na curva de eluição de nitrato que o fator de retardamento, a dispersão e a simetria da curva decresceram notadamente quando comparada com o tratamento sem calagem, indicando uma baixa adsorção de nitrato nas colunas. Neste experimento de campo, foi detectada a presença de nitrato proveniente do fertilizante e cloreto logo após terem sido drenados entre 2,1 e 3,4 volumes de poro durante o período de maior precipitação, como aconteceu no experimento em colunas de solo.

No mesmo sentido, Dynia e Camargo (1998; 1999) encontraram, seis anos após a aplicação de calcário, que a adubação fosfatada e a adubação fosfatada+calagem (principalmente) reduziram a capacidade de retenção de nitrato. Também Alcântara e Camargo (2005) observaram que adições de sulfato e fosfato ao solo resultaram em pequena diminuição na adsorção de nitrato no horizonte B de um Latossolo Vermelho acriférrico. Explicaram que pela diminuição da carga líquida provocada pela adição de sulfato e pela afinidade por sítios de troca carregados positivamente, a adsorção de nitrato seria menor. No mesmo trabalho explica-se que o SO_4^{2-} e o $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ conseguem ocupar os mesmos sítios de adsorção do NO_3^- , mas suas afinidades seriam diferentes. Como o ânion $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ apresenta maior afinidade pelos sítios de troca em relação ao NO_3^- , ele os preencheria previamente, favorecendo a exclusão do nitrato.

O NO_3^- teve um comportamento diferente ao SO_4^{2-} sendo que não existiram diferenças significativas na quantidade lixiviada de S entre tratamentos fertilizados. Halvin et al. (2005) cita uma série de fatores associados ao solo que afetam o fenômeno de adsorção/dessorção do SO_4^{2-} que neste experimento teriam contribuído para evitar a lixiviação do sulfato: o aumento da quantidade de óxidos de Fe/Al com a profundidade, o perfil do solo enquadrado na categoria de

caulinítico, a maior quantidade de matéria orgânica na superfície e o aumento da acidez com a profundidade originando uma diminuição da carga líquida negativa. Além dos fatores mencionados, a concentração do sulfato adsorvido se equilibra com o da solução (FOX, 1976); portanto um aumento da concentração de sulfato na solução no solo causada pela aplicação do fertilizante faz com que também aumentasse a quantidade adsorvida de SO_4^- .

Também existem evidências que incrementando a concentração do íon nitrato, incrementa-se a adsorção de sulfato em suspensões com ΔpH negativo (MEKARU; UEHARA, 1972) podendo ser uma das causas da baixa quantidade de S lixiviado. A interação na adsorção de nitrato com cloreto, sulfato e fosfato foi estudada também por Kinjo e Pratt (1971b) em solos com carga variável, entre eles, Latossolos. Mostraram que o Cl^- foi debilmente preferido ao nitrato na adsorção e que SO_4^- e H_2PO_4^- tiveram maior afinidade por sítios de adsorção que o nitrato, podendo existir até adsorção negativa do nitrato quando sulfato e fosfato atingiram uma determinada concentração. Como já conhecido, a adsorção de ânions incrementa-se na seguinte ordem: $\text{NO}_3^- < \text{SO}_4^- < \text{H}_2\text{PO}_4^-$ (KINJO; PRATT, 1971b) explicando, em parte, a baixa perda por lixiviação de enxofre e fósforo e a elevada perda de nitrogênio na forma de nitrato nos tratamentos fertilizados.

Segundo Camberato e Pan (2000), Latossolos, Nitossolos e Argissolos (Ultisols, Alfisols e Oxisols) possuem elevada capacidade de adsorção de SO_4^{2-} devido à abundância de óxidos de Fe e Al e ao baixo pH. Se o solo deste experimento se comportasse dessa forma, possivelmente o S teria sido retido em camadas superficiais e não lixiviado. Suporta esta hipótese, o fato de o valor do pH medido por Faroni (2008), antes da adubação da cana-soca, foi, 5,4 na camada de 0 a 0,25 m e 4,5, na camada de 0,25 a 0,5 m. Outra hipótese é que como o conteúdo inicial de S no solo era inferior ao recomendado para cana-de-açúcar (FARONI, 2008), a cultura tenha utilizado o enxofre aplicado como fertilizante evitando-se assim perdas por lixiviação do elemento. Suporta esta hipótese, o aumento no teor de S em folhas diagnósticas na fase de máximo crescimento da cana-de-açúcar, indicando maior acúmulo do enxofre na planta como também encontrado por Faroni (2008). O efeito sinérgico do aumento da absorção de S pela cana-de-açúcar perante doses mais elevadas de N com a conseqüente diminuição na lixiviação do S foi observada também por Bologna-Campbell (2007) em experimento em vasos de 220 L.

Em vista da elevada quantidade de Ca e Mg lixiviadas (Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20), não deve deixar-se de considerar que a área experimental foi um setor de aplicação de vinhaça, rica em potássio e nitrogênio e foram adicionados 120 kg ha⁻¹ de K₂O na primeira soca. Esse potássio poderia deslocar Ca e Mg de sítios de troca favorecendo-se a lixiviação desses elementos. Um mecanismo similar é dado pelo efeito dos prótons liberados na transformação de amônio para nitrato no processo de nitrificação, que seriam trocados com cátions retidos no complexo de troca. O mencionado mecanismo já foi relatado por vários autores que mediram a lixiviação de nitrato, cálcio, potássio e magnésio em lisímetros ou no campo com tensiômetros e extratores de solução em Latossolos (Oxisols) (POSS; SARAGONI, 1992; WONG et al., 1992; PAUL; NG KEE KWONG; DEVILLE, 1998).

No ciclo agrícola de cana-soca, a lixiviação de N foi significativamente maior no tratamento 2, onde também foi importante a quantidade lixiviada de K, Ca e Mg. É importante salientar que além dos possíveis problemas de poluição que pode originar a lixiviação de N, os agroecossistemas podem degradar-se pela perda de outros íons como Ca e Mg, que são arrastados para camadas profundas com a conseqüente acidificação do solo (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984; POSS; SARAGONI, 1992; CAHN et al., 1993; HARTEMINK, 2008). Lembrando que a acidificação é reversível por calagem, mas que quando isso ocorre no subsolo essa correção é mais difícil de proceder (HARTEMINK, 2008). Portanto, implementar um manejo que evite perdas por lixiviação de N ajuda a manter as funções produtivas do solo.

Juntamente com os ânions movimentaram-se quantidades equivalentes de cátions (Tabela 14) promovendo a perda de fertilidade do solo e, possivelmente, induzindo à acidificação, importante quando se observa a baixa saturação por bases nas camadas abaixo de 0,35 m no Latossolo Vermelho distrófico estudado (Tabela 1). Cahn et al. (1993), em estudo num Latossolo (Typic Acrudox) na Amazônia, verificaram que a fertilização nitrogenada e as altas taxas de lixiviação de NO₃⁻ aceleraram as perdas de Ca e Mg, originando acidificação na camada arável. Este efeito poderia ser minimizado, em parte, em períodos com ascensão capilar e transporte de solutos para a superfície e pela reciclagem de elementos absorvidos em profundidade pelas raízes e transportados para a superfície, como provado em outras espécies (MEKONNEN; BURESH; JAMA, 1997) e em diferentes usos do solo (WILCKE; LILIENFEIN, 2005).

Pela informação apresentada na Tabela 13, nos períodos avaliados, as plantas utilizaram

água de camadas profundas o que seria importante em épocas de estiagem e na reciclagem de nutrientes. No mesmo sentido, Stewart et al. (2006), utilizando o modelo de simulação APSIM-SWIM, mostraram que as raízes de cana-de-açúcar removeram água e nitrogênio a 1,5 m de profundidade reduzindo o movimento de nitrato para o lençol freático. Por tais motivos manter a qualidade do solo para o enraizamento deve ser um objetivo no manejo do solo. Segundo Wong et al. (1992), o movimento de cátions básicos para o subsolo pode ser benéfico por favorecer o crescimento de raízes em profundidade em solos deficientes em Ca e Mg. Mas, baseados em seus resultados, ressaltaram que esses cátions podem ser perdidos junto com o nitrato na água de drenagem, independente se o N é nativo ou proveniente do fertilizante. Segundo os autores, esses íons deveriam ser repostos, especialmente em solos com baixa quantidade de bases como o solo arenoso ácido que eles estudaram.

Das colocações efetuadas se desprende que, devido às perdas de nutrientes observadas a 0,9 m de profundidade, a reciclagem de nutrientes é importante quando tomam medidas para melhorar o subsolo, evitando-se perdas de nutrientes do sistema radicular. Essa prática é baseada em diversos trabalhos de pesquisa em solos ácidos de carga variável que mostram que o cálcio aplicado como gesso agrícola pode ser transportado em profundidade melhorando as propriedades químicas subsuperficiais (QAFOKU et al., 2004; QAFOKU; SUMNER; TOMA, 2005; VITTI, G.C. et al., 2008). As conclusões são válidas, mas estão geralmente embasadas em experimentos em colunas com solo deformado e restritas ao estudo principalmente de atributos físico-químicos. Segundo Alcântara e Camargo (2005), “tais resultados revelam que experimentos envolvendo apenas aspectos físicos e químicos do solo, apesar de facilitarem o entendimento de alguns processos envolvidos, devem ser vistos tão somente como uma etapa no entendimento da dinâmica desse íon no solo”. Os resultados apresentados mostram que precisam ser desenvolvidas pesquisas abrangentes do sistema solo-planta para entender e poder manipular a acidez do subsolo visando o melhor desenvolvimento de plantas cultivadas.

Cabe salientar que além da resolução de problemas de fertilidade química existentes no subsolo, deve ser considerada sua qualidade física, de forma a garantir a qualidade do solo para o crescimento radicular. Os resultados de falta de enraizamento nas entrelinhas no ciclo agrícola de cana-planta (OTTO, 2007; OTTO et al., 2009) estão em concordância o menor IHO nas camadas entre 0,25 a 0,55 m (ver Anexo B), originados pela elevada resistência à penetração das raízes, presumivelmente, pelo tráfego de máquinas de grande porte pelas entrelinhas.

Finalmente, mesmo com as perdas por lixiviação quantificadas e, com a elevada condutividade hidráulica medida a 0,9 m de profundidade (Tabela 9), os resultados não são suficientes para afirmar que o lençol freático seja prejudicado. Como salientam Alcântara e Camargo (2005) para prever a movimentação de um elemento, seria necessário estudar a influência da carga líquida e seu retardamento no subsolo e avaliar como os diferentes elementos se acumulam ou são perdidos para camadas profundas atingindo o lençol freático. Estudos desse tipo na cultura de cana-de-açúcar foram desenvolvidos por Rasiah e Armour (2001), Rasiah et al. (2003) e Thorburn et al. (2003a) nos quais efetivamente se associou a fertilização nitrogenada em cana-de-açúcar à poluição do lençol freático com nitrogênio. Também Muchovej e Newman (2004) concluíram que a água subterrânea pode ser prejudicada, em solo arenoso na Flórida com o lençol freático a menos de 1,0 m de profundidade e recomendaram aplicações parceladas de nitrato de amônio menores a 70 kg ha^{-1} de N para prevenir o acréscimo da concentração de N.

No Brasil, especificamente em uma região perto de Jaboticabal-SP, em Riberão Preto-SP, observou-se que os atributos eletroquímicos dos solos estudados (Latosolos e Neossolos Quartzarênicos) eram favoráveis à retenção de nitrato em profundidade (DYNIA, 2000). O autor encontrou zonas de acumulação de nitrato entre 2,6 e 6,0 m indicando que o nitrato está se acumulando no tempo. Quando a capacidade de adsorção de nitrato será completada nos principais solos onde se produz cana-de-açúcar? Ainda é uma incógnita que precisa de maior pesquisa.

3 CONCLUSÕES

Sob as condições experimentais deste estudo, registraram-se perdas apreciáveis de N por lixiviação, tanto nativo como proveniente do fertilizante, mesmo com elevada demanda de nutrientes pela cana-soca, devido a fatores que favoreceram a lixiviação: precipitação pluvial superior ao normal, solo de elevada permeabilidade, uma única aplicação de fertilizante e conteúdo de água no solo e temperatura favoráveis à nitrificação. Portanto, as perdas desse elemento por lixiviação não podem ser negligenciadas nas condições agroecológicas estudadas e podem afetar a resposta à adubação da cana-de-açúcar. No solo estudado, não se observou similar comportamento para enxofre e fósforo comparado com o do nitrogênio. A lixiviação dos cátions potássio, cálcio e magnésio foram importantes, sendo um fator a ser considerado no manejo da qualidade química do subsolo, que junto à qualidade física, devem ser mantidas para assegurar o enraizamento da cana-de-açúcar. A informação obtida não permite afirmar que o lençol freático será prejudicado nem associar à cultura de cana-de-açúcar com sua poluição, mas sim que se devem tomar providências que permitam manter a qualidade dos atributos químicos e físicos do solo. Nesse contexto, considerando o conceito de sustentabilidade, será menor o risco de poluição do lençol freático, menor a perda de nutrientes por lixiviação e menor o perigo de acidificação do solo, além de incrementar-se a produtividade da cana-de-açúcar e diminuir-se os custos por fertilização.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M.A.; CAMARGO, O.A. Nitrate adsorption in variable charged soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 369-376, abr. 2005.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 298 p.
- ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A. Ponto de efeito salino nulo: proposição de nomenclatura. **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 1, p. 5-11, jan./abr. 1993.
- _____. Physical attributes of acric Oxisols from the state of São Paulo - Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p. 321-326, May/Aug. 1994a.
- _____. Electric surface potential and net electric charge of acric Oxisols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, n. 2, p. 181-185, May/Aug. 1994b.
- ALLMARAS, R.R.; KEMPTHORNE, O. Errors, variability and precision. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods. chap. 1.3, p. 15-44.
- ALLRED, B.J. Cation effects on nitrate mobility in an unsaturated soil. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 51, n. 6, p. 1997-2012, Nov./Dec. 2008.
- ALVES, M.E.; MACEDONIO, C.R.; LAVORENTI, A. **Sistema para determinação analítica do ponto de efeito salino de amostras de solo - PESN para Windows, versão 1.0**. Piracicaba, 2001. Disponível em: <<http://superdownloads.uol.com.br/download/117/pesn-windows/>>. Acesso em: 11 jul. 2008.
- ANKENY, M.D.; AHMED, M.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 467-470, Mar./Apr. 1991.
- ARMSTRONG, A.C.; BURT, T.P. Nitrate losses from agricultural land. In: BURT, T.P.; HEATHWAITE, A.L.; TRUDGILL, S.T. **Nitrate: processes, patterns, and management**. New York: John Wiley, 1993. chap. 9, p. 239-267.
- ARREGUI, L.M.; QUEMADA, M. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: application of capacitance probes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 288, n. 1/2, p. 57-69, Oct. 2006.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. On simple methods for unsaturated soil hydraulic conductivity determination. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 50, n. 2, p. 326-328, Jan./Sept. 1993.

BAILEY, S.A.; SMITH, J.M. Improved method for the preparation of sulfur dioxide from barium sulfate for isotope ratio studies. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 44, n. 8, p. 1542-1543, July 1972.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant Soil**, Dordrecht, v.142, n. 2, p. 297-305, May 1992.

BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORROCHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; DE MACEDO, V. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1/2 , p. 235-248, Sept. 2003.

BELLINI, G.; SUMNER, M.E.; RADCLIFFE, D.E.; QAFOKU, N.P. Anion transport through columns of highly weathered acid soil: adsorption and retardation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 1, p. 132-137, Jan./Feb. 1996.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, chap.13, p. 363 - 375.

BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2007. 112 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Nitrogen and sulfur economy in soils. In: _____. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Prentice Hall, 1999a. chap. 13, p. 491-539.

_____. Soil phosphorus and potassium. In: _____. **The nature and properties of soils**. New Jersey: Prentice Hall, 1999b. chap. 14, p. 540-584.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; GHIERTO, P.J. Water flux density, actual evapotranspiration and water storage in two sugar-cane cropped soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2 , p. 295-303, Apr./June 2009.

BRITO, A.S.; LIBARDI, P.L.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 2 , p. 17-24, jan./mar. 2009.

BRITO, P. **Balanço 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.

CAHN, M.D.; BOULDIN, D.R.; CRAVO, M.S.; BOWEN, W.T. Cation and nitrate leaching in an Oxisol of the Brazilian Amazon. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 2, p. 334-340, Mar. 1993.

CAMARGO, P. **Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: uréia (^{15}N) e aquamônia (^{15}N) incorporados ao solo na cultura de cana-de-açúcar.** 1989. 104 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Alguns métodos e terminologias em eletroquímica de solos. In: FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (Ed.). **Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; UFV, Depto. de Solos, 1996. p. 475-487.

CAMBERATO, J.J.; PAN, W.L. Bioavailability of calcium, magnesium, and sulfur. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science.** New York: CRC Press, 2000. chap. D.1.5, p. D53-D69.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. cap. 9, p. 173-180.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S.; VITTI, G.C. (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. cap. 11, p. 355-412.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; CONTIN, T.L.M.; DIAS, F.L.F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R.B.; QUAGGIO, J.A. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397-401, July/Aug. 2008.

CHAPMAN, L.S.; HAYSOM, M.B.C.; SAFFIGNA, P.G. The recovery of ^{15}N from labelled urea fertilizer in crop components of sugarcane and in soil profiles. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 45, n. 7, p. 1577-1585, May. 1994.

DEMATTÊ, J.L.I. Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 1, n. 1., p. 48-59, jan./jun. 2004.

DIRKSEN, C.H. Unsaturated hydraulic conductivity. In: SMITH, K.A.; MULLINS C.E. (Ed.). **Soil analysis: physical methods.** New York: Dekker, 1991. chap. 5, p. 209-269.

DYNIA, J.F. Nitrate retention and leaching in variable charge soils of a watershed in São Paulo State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5/6, p. 777-792, 2000.

DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Effects of liming, green manuring, and phosphate addition on electrochemical attributes of an Oxisol from Central Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, n. 5/6, p. 755-762, 1998.

_____. Nitrate retention in a variable-charge soil, as influenced by phosphate fertilizing and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 1, p. 141-144, jan. 1999.

EL WALI, A.M.O.; LE GRAND, F.; GASCHO, G.J. Nitrogen leaching from soil and uptake by sugarcane from various urea-based fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 1, p. 119-122, Jan. 1980.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

FALLEIROS, M.C.; PORTEZAN, O., OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water distribution, using an exponential model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, n. 3/4, p. 279-285, May 1998.

FARONI, C.E. **Eficiência agronômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 190 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FERNANADES, A.M. **Comportamento do N inorgânico dissolvido em águas superficiais e sub-superficiais em área com cultivo de cana-de-açúcar**. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FERNANDES, F.; LIBARDI, P.L.; CARVALHO, L. Internal drainage and nitrate leaching in a corn-black oat-corn succession with two split nitrogen applications. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 5, p. 483-492, Sept./Oct. 2006.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 627-646, jul./set. 2001.

FOX, R.L. Sulfur and nitrogen requirements of sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 6, p. 891-896, Nov. 1976.

FRANCO, H.C.J. **Eficiência agronômica da adubação nitrogenada de cana-planta**. 2008. 127 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FRANCO, H.C.J.; TRIVELIN, P.C.O.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; OTTO, R. Utilization of sugar cane of nitrogen applied at planting. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, special issue, p. 2763-2770, nov./dez. 2008.

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 do canavial. **STAB. Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 32-36, 2007.

GARDNER, W.H. Water Content. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, chap. 21, p. 493-541.

GAVA, G.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; PENATTI, C.P. Growth and accumulation of nitrogen by sugarcane cultivated in soil covered with cane trash. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, nov. 2001.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods, chap. 2.4, p. 255-293.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept. 1980.

GENUCHTEN, M.T. van; SIMUNEK, J.; LEIJ, F.J.; SEJNA, M. **Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils – RETC Version 6.0**. Riverside: US Salinity Laboratory. 1998. Disponível em: <<http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx>>. Acesso em: 08 Aug. 2007.

GHIBERTO, P.J. **Metodologias para a obtenção de parâmetros utilizados em modelos de infiltração da água no solo**. 1999. 80 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GHIBERTO, P.J.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultisol in Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 10, p. 1443-1448, Oct. 2009a.

_____. Quantificação do nitrogênio lixiviado em um Latossolo cultivado com cana de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBCS, 2009b. 1 CD-ROM.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, June 2008.

GOURLEY, C.; RIDLEY, A. Controlling non-point source pollution in Australian agricultural systems. **Pedosphere**, v. 15, n. 6, p. 768-777, Dec. 2005.

GROFFMAN, P.M. Nitrogen in the environment. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. chap. C.4.5, p. C190-C200.

HALVIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. New Jersey: Prentice Hall, 2005. 1994. 515 p.

HARTEMINK, A.E. Sugarcane for bioethanol: soil and environmental issues. In: SPARKS, D. (Ed.). **Advances in Agronomy** 99. New York: Academic Press, 2008. p. 125-182.

HAUCK, R.D.; BREMNER, J.M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. In: SPARKS, D. (Ed.). **Advances in Agronomy** 28. New York: Academic Press, 1976. p. 219-266.

HENDRICKX, J.M.H.; WRAITH, J.M.; CORWIN, D.L.; KACHANOSKI, R.G. Miscible solute transport. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods, chap. 6.1, p. 1253-1321.

HENNIES, C.E.; GUIMARÃES, W.O.N.; ROVERSI, J.A. Erros e desvios de médias. In: _____. **Problemas experimentais em física**. Campinas: Ed. UNICAMP, 1986. v. 1, cap. 4, p. 148-163.

HILLEL, D. Water content and potential. In: _____. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Elsevier, 2004. chap. 6, p. 93-126.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristic in situ. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, n. 5, p. 395-400, July/Dec. 1972.

INMAN-BAMBER, M.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Fields Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 185-202, June 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do estado de São Paulo**: escala 1:500.000. São Paulo, 1981, v. 1, 126 p.

JANSSON, S.L.; PERSSON, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F.J.; BREMMER, J.M.; HAUCK, R.D.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. chap. 13, p. 467-502.

JARVIS, N.J.; MESSING, I. Near-Saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 1, p. 27-34, Jan./Feb. 1995.

JURY, A.J.; FLÜHLER, H. Transport of chemicals through soil: mechanisms, models, and field applications. In: SPARKS, D. (Ed.). **Advances in Agronomy** 47. New York: Academic Press, 1992. p. 141-201.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. chap. A.7, p. A229-A276.

KINJO, T.; PRATT, P.F. Nitrate adsorption: I. In some acid soils of Mexico and South America. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 4, p. 722-725, July/Aug. 1971a.

_____. Nitrate adsorption: II. In competition with chloride, sulfate, and phosphate. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 4, p. 725-728, July/Aug. 1971b.

KLUTE, A.; GARDNER, W.R. Tensiometer response time. **Soil Science**, New Jersey, v. 31, n. 1, p. 204-207, Jan./June 1962.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. **Soil hydrology**. Cremlingen-Destedt: Catena-Verlag, 1994. 370 p.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. da; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 4, p. 1210-1215, July/Aug. 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: STEWART, B.A. (Ed.). **Advances in soil science**. New York: Springer-Verlag, 1985. v. 1, p. 277-294.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Destino de uréia aplicada a um solo tropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 40-44, jan./abr. 1978.

LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 1-12, jan./abr. 1996.

LIBARDI, P.L.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K.; CERVELLINI, A. Nitrogen cycling in a ¹⁵N-fertilized bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 67, p. 193-208, Feb. 1982.

MALAVOLTA, E. **Fertilizing for high yield sugarcane**. Basel: International Potash Institute, 1994. 104 p.

MALAVOLTA, E. Fósforo. In: _____. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronomica Ceres, 2006. p. 163-193.

MARTINELLI, L.A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, Washington, v. 18, n. 4, p. 885-898, June 2008.

MAXIMO, E.; BENDASSOLLI, J.A.; TRIVELIN, P.C.O.; ROSSETE, A.L.; OLIVEIRA DE, R.; PRESTES, C.P. Produção de sulfato de amônio duplamente marcado com os isótopos estáveis ¹⁵N e ³⁴S. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 211-216, mar./abr. 2005.

- McNEILL, A.M.; ERIKSEN, J.; BERGSTRÖM, L.; SMITH, K.A.; MARSTORP, H.; KIRCHMANN, H.; NILSSON, I. Nitrogen and sulphur management: challenges for organic sources in temperate agricultural systems. **Soil Use and Management**, Melbourne, v. 21, n. 1, p. 82-93, Mar. 2005.
- MEIER, E.A.; THORBURN, P.J.; WEGENER, M.K.; BASFORD K.E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 75, n. 1/3, p. 101-114, July 2006.
- MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 83-88, maio/ago. 1980.
- MEKARU, T.; UEHARA, G. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 36, n. 2, p. 296-300, Mar./Apr. 1972.
- MEKONNEN, K.; BURESH, R.J.; JAMA, B. Root and inorganic nitrogen distribution in sesbania fallow, natural fallow and maize fields. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 188, n. 2, p. 319-327, Jan. 1997.
- MUCHOVEJ, R.M.; NEWMAN, P.R. Nitrogen fertilization of sugarcane on a sandy soil: II. Soil and groundwater analyses. **Journal of American Society Sugar Cane Technologists**, v. 24, p. 225-240, 2004. Disponível em: <<http://www.assct.org/journal/journal.htm>>. Acesso em: 11 nov. 2009.
- MULLINS, C.E. Matric potential. In: SMITH, K.A; MULLINS C.E., (Ed.) **Soil analysis: physical methods**. New York: Dekker, 1991. chap. 5, p. 75-109.
- NAIDU, R.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W.; KIRKMAN, J.H. Effect of liming and added phosphate on charge characteristics. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, n. 1, p. 157-164, Mar. 1990.
- NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius Indian Ocean. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 13, n. 3, p. 471-474, July/Sept. 1984.
- _____. Residual fertilizer nitrogen as influenced by timing and nitrogen forms in a silty clay soil under sugarcane in Mauritius. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 14, n. 3, p. 219-226, Oct. 1987.
- _____. The course of fertilizer nitrogen uptake by rainfed sugarcane in Mauritius. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 52, n. 3, p. 385-391, June 1994.
- NIELSEN, D.R.J.; BIGGAR, J.W.; ERH, K.T. Spatial variability of field measured soil water properties. **Hilgardia**, Berkel, v. 42, n. 7, p. 215-26, Nov. 1973.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; WIERENGA, P.J. Nitrogen transport processes in soil. In: STEVENSON, F.J.; BREMMER, J.M.; HAUCK, R.D.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. chap. 11, p. 423-445.

OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; VITTI, A.C.; FARONI, C.A.; GAVA, G.C. Acúmulo de fitomassa e nitrogênio na cana-de-açúcar em três condições edafoclimáticas do estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SBCS, 2009. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R.; MORAES, S.O. Nitrate leaching in a sewage sludge-amended Typic Hapludox cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 171-180, Jan./Mar. 2001.

OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.; TIMM, L.C.; DOURADO-NETO, D.; TRIVELIN, P.C.O.; TOMINAGA, T.; NAVARRO, R.; PÍCCOLO, M.; CÁSSARO, F. Nitrogen dynamics in a soil-sugar cane system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 467-472, July/Sept. 2000.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO M. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, dez. 1999.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; MORATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 861-868, jun. 2002.

OTTO, R. **Desenvolvimento de raízes e produtividade de cana-de-açúcar relacionados à adubação nitrogenada**. 2007. 117 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

OTTO, R.; TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Visoça, v. 30, n. 3, p. 601-611, mar./jun. 2009.

PAUL, J.P.; NG KEE KWONG; DEVILLE, J. Potassium leaching in soils under rainfed sugar cane in Mauritius. In: ANNUAL MEETING OF AGRICULTURAL SCIENTISTS, 3., 1998, Reunion. **Proceedings...** Reunion, Mauritius: FARC, 1998. Disponível em: <<http://www.gov.mu/portal/sites/ncb/moa/farc/amas98/tc.htm>>. Acesso em: 15 out. 2009.

PERROUX, K.M.; WHITE, I. Designs for disk permeameters. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 5, p. 1205-1215, Sept. 1988.

PIERZYNSKI, G.M.; SIMS, J.T.; VANCE, G.F. Soil nitrogen and environmental quality. In: _____. **Soils and environmental quality**. Boca Raton: CRC Press, 2005. chap. 5, p. 133-184.

PORTER, L.K. Depleted ^{15}N carryover, leaching and uptake for three years of irrigated corn. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 20, n. 3/4, p. 209-226, Dec., 1995.

POSS, R.; SARAGONI, H. Leaching of nitrate, calcium and magnesium under maize cultivation on an oxisol in Togo. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 33, n. 2, p. 123-133, Nov. 1992.

PRASERTSAK, P.; FRENEY, J.R.; DENMEAD, O.T.; SAFFIGNA, P.G.; PROVE, B.G.; REGHENZANI, J.R. Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 62, n. 3, p. 229-239, Mar. 2002.

QAFOKU, N.P.; RANST, E. van; NOBLE, A.; BAERT, G. Variable charge soils: their mineralogy, chemistry and management. In: SPARKS, D. (Ed.). **Advances in Agronomy 84**. New York: Academic Press, 2004. p. 159-215.

QAFOKU, N.P.; SUMNER, M.E. Retention and transport of calcium nitrate in variable charge subsoils. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 5, p. 297-307, May 2001.

QAFOKU, N.P.; SUMNER, M.E.; TOMA, M. Ion transport dynamics in acid variable charge subsoils. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 51, n. 5, p. 601-603, Sept. 2005.

RAIJ, B. van; PEECH, M. Electrochemical properties of some oxisols and alfisols of the tropics. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 36, n. 2, p. 587-593, July/Aug. 1972.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico; Fundação IAC, 1997. 285 p.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 3, p. 357-363, June 1999.

RASIAH, V.; ARMOUR, J.D. Nitrate accumulation under cropping in the Ferrosols of Far North Queensland wet tropics. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 39, n. 2, p. 329-341, 2001.

RASIAH, V.; ARMOUR, J.D.; YAMAMOTO, T.; MAHENDRARAJAH, S.; HEINER, D.H. Nitrate dynamics in shallow groundwater and the potential for transport off-site water bodies. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 147, n. 1/4, p. 183-202, July 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Balanço hídrico. In: _____. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. cap. 15, p. 323-339.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; VICTÓRIA, R.L.; VIEGAS, G.P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 17-20, jan./abr., 1979.

- REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; VILLAGRA, M.M.; TURATTI, A.L.; PEDROSA, Z.O. Hydraulic variability in space and time in a dark red latosol of the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 60, n. 1/4, p. 159-168, Dec. 1993.
- RENK, A.; LEHMANN, J. Rapid water flow and transport of inorganic and organic nitrogen in a highly aggregated tropical soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 169, n. 5, p. 330-341, May 2004.
- ROBERTSON, F.A.; THORBURN, P.J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 45, p. 1-11, Feb. 2007.
- ROMANO, N.; SANTINI, A. Field. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods, chap. 3.3.3, p. 721-738.
- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient dynamics in sugar cane. II $\text{NO}_3\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$ lateral and vertical movement in the soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 9, p. 1103-1108, set. 1984.
- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ALVES, G.D. Carbon and nitrogen mineralization in soil cultivated with sugar cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, n. 1, p. 33-38, jan./abr. 1985.
- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; CARNEIRO, C.J.G. Nutrient cycling in sugarcane. IV. Leaching losses of N in plant-cane fertilized with urea- ^{15}N . **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 7, p. 725-732, jul. 1988.
- SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Nutrient cycling in sugarcane. I. Plant recovery of N from single or split urea (^{15}N) application. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 8, p. 943-949, ago. 1984.
- SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 92 p.
- SCHWAB, A.P. The soil solution. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. New York: CRC Press, 2000. chap. B.3, p. B85-B121.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balances hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras**. Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/bhbrasil/Saopaulo>>. Acesso em: 15 out. 2009.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Banco de dados pluviométricos do estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>. Acesso em: 10 dez. 2007.

SILVA, A.L. da; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 162-170, Mar. 2007.

SILVA, A.L. da; ROVERATTI, R.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TIMM, L.C.; BRUNO, I.P.; OLIVEIRA, J.C.M.; DOURADO-NETO, D. Variability of water balance components in a coffee crop in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 105-114, Mar./Apr. 2006.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2, p. 167-174, Dec. 2004.

SILVA, A.P. da.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, Nov./Dec. 1994.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S. Least limiting water range of soils. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of soil science**. London: Taylor & Francis, 2006. p. 1026-1029.

SKAGGS, T.H.; LEIJ, F.J. Solute transport: theoretical background. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods, chap. 6.3, p. 1353-1380.

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, June 2005.

SORENSEN, P.; JENSEN, E.S. Sequential diffusion of ammonium and nitrate from soil extracts to a polytetrafluoroethylene trap for ^{15}N determination. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 252, p. 201-203, May 1991.

SOUTHWICK, L.M.; WILLIS, G.H.; JOHNSON, D.C.; SELIM, H.M. Leaching of nitrate, atrazine, and metribuzin from sugarcane in southern Louisiana. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 24, n. 4, p. 684-690, July/Aug. 1995.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <<http://www.soils.org/publications/soil-glossary>>. Acesso em: 15 out. 2009.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. **SAS/STAT: procedure guide for personal computers**. Version 5. Cary, 1991.

STEWART, L.K.; CHARLESWORTH, P.B.; BRISTOW, K.L.; THORBURN, P.J. Estimating deep drainage and nitrate leaching from the root zone under sugarcane using APSIM-SWIM. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, n. 3, p. 315-334, Mar. 2006.

TABATAI, M.A.; BASTA, N.T. Ion Chromatography. In: SMITH, K.T. (Ed.). **Soil analysis: modern instrumental techniques**. New York: Marcel Dekker, 1991. chap. 5, p. 229-259.

THORBURN, P.J.; BIGGS, J.S.; WEIER, K.L.; KEATING, B.A. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. **Agricultural, Ecosystems Environment**, Amsterdam, v. 94, n. 1, p. 49-48, Jan. 2003a.

THORBURN, P.J.; DART, I.K.; BIGGS, I.M.; BAILLE, C.P.; SMITH, M.A.; KEATING, B.A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, n. 3-4, p. 201-209, Nov., 2003b.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

TOLLNER, E.W. Precipitation. In: _____. **Natural resources engineering**. Ames: Iowa State Press, 2002. chap. 2, p. 20-50.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Utilization by late harvest sugar cane ratoon of nitrogen from ^{15}N -aqua ammonia and ^{15}N -uréia applied to the soil as vinasse N-complement. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 12, p. 1375-1385, dez. 1995.

TRIVELIN, P.C.O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Evaluation of a ^{15}N plot desing for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p. 226-234, May/Aug. 1994.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 2, p. 193-201, fev. 2002a.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Nitrogen utilization and sugarcane (plant cane) yield on a sandy soil with incorporated crop residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Visoça, v. 26, n. 3, p. 637-646, July/Set. 2002b.

URQUIAGA-CABALLERO, S.S.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; MORAES, S.O.; VICTÓRIA, R.L. Leaching of N derived from the soil and from $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ fertilizer during the growth cycle of bean plants. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 1, p. 25-31, jan. 1986.

VALLIS, I.; CATCHPOOLE, V.R.; HUGHES, R.M.; MYERS, J.K.; RIDGE, D.R.; WEIER, K.L. Recovery in plants and soils of ^{15}N applied as subsurface bands of urea to sugarcane. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourn, v. 47, n. 3, p. 355-370, 1996.

VERBURG, K.; KEATING, B.A.; PROBERT, M.E.; BRISTOW, K.L.; HUTH, N.I. Nitrate leaching under sugarcane: interactions between crop yield, soil type and management strategies. In: CONFERENCE ON AGRONOMY-GROWING GREENER FUTURE, 9., 1998, Wagga. **Proceedings...** Wagga: Australian Society of Agronomy, 1998. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/asa/1998/8/235verbург.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2009.

- VICTORIA, R.L.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; MATSUI, E. ^{15}N -urea transport and transformation in two deforested Amazonian soils under laboratory conditions. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 67, n. 1-3, p. 129-137, Feb. 1982.
- VILLAGRA, M.M.; BACCHI, O.O.S.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 72, n. 3/4, p. 317-325, Jan. 1995.
- VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 36, p. 205-210, set./dez. 1988.
- VITTI, A. **Utilização pela cana-de-açúcar (cana-planta) do nitrogênio da uréia (^{15}N) e do mineralizado no solo em sistemas de manejo com e sem a queima**. 1998. 93 p. Tese (Mestre Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Sugarcane yield as related to the location of nitrogen fertilizer applied on top of unburnt sugar cane residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Visoça, v. 31, n. 3, p. 491-498, maio/jun. 2007.
- VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H.C.J.; FARONI, C.E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M.O.; TOVAJAR, J.G. Straw mineralization and root growth of sugar cane as related to nitrogen fertilization at planting. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Visoça, v. 32, n. Special Issue, p. 2757-2762, nov./dez. 2008.
- VITTI, G.C.; LUZ, P.H.C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A.S.; SERRANO, C.G. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 2008. 104 p.
- WANG, F.L.; ALVA, A.K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 5, p. 1454-1458, Sept./Oct. 1996.
- WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. chap. 13, p. 319-344.
- WILCKE, W.; LILIENFEIN, J. Nutrient leaching in oxisols under native and managed vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 4, p. 1152-1161, July/Aug. 2005.
- WOLT, J.D. Soil solution composition. In: _____. **Soil solution chemistry: applications to environmental science and agriculture**. New York: John Wiley, 1994. chap. 7, p. 144-168.

WONG, M.T.F.; KRUIJS, A.C.B.M. van der; JUO, A.S.R. Leaching loss of calcium, magnesium, potassium and nitrate derived from soil, lime and fertilizers as influenced by urea applied to undisturbed lysimeters in south-east Nigeria. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 31, n. 3, p. 281-289, June 1992.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 69-85, Apr. 1991.

YANAGISAWA, F.; SAKAL, H. Thermal decomposition of barium sulfate-vanadium pentaoxide-silica glass mixtures for preparation of sulfur dioxide in sulfur isotope ratio measurements. **Analytical Chemistry**, v. 55, n. 6, p. 985-987, May 1983.

YEH, T.C.J.; GELHAR, L.W.; WIERENGA, P.J. Observations of spatial variability of soil-water pressure in a field. **Soil Science**, Baltimore, v. 142, n. 1, p. 7-12, July 1986.

YOUNG, M.H.; SISSON, J.B. Tensiometry. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. pt. 4: Physical methods, chap. 3.2.2, p. 575-608.

ANEXOS

ANEXO A – Levantamento planialtimétrico da área experimental

O levantamento planialtimétrico da área experimental foi realizado utilizando-se a estação total Pentax RN115 com erro de $5\text{ mm} \pm 1\text{ppm}$. Os pontos de coleta foram as extremidades de cada parcela no talhão experimental de cana-de-açúcar mais os pontos notáveis, num total de 231 pontos, abrangendo uma área de 5,6 ha. Foram também coletados pontos em lugares onde instalaram-se os 12 conjuntos equipamentos (tensiômetros e extrator de solução do solo com cápsula porosa) e o pluviômetro.

A localização geográfica da área experimental foi obtida com GPS submétrico pós-processado da marca Trimble modelo PROX R. A partir desse valor foram calculados os demais pontos da área utilizando-se o programa TopoEvn versão 6.0, no departamento de Engenharia Rural (ESALQ/USP) na área de topografia e geoprocessamento. O mesmo programa foi utilizado para a elaboração dos cálculos topográficos e confeição dos mapas planialtimétrico e clinográfico, os quais encontram-se na Figura 35 e Figura 36.

Figura 35 - Representação gráfica do mapa planialtimétrico da área de estudo

Quadro de Áreas		
Descrição	m ²	Ha
Area 1	10.597,752	1,0598
Area 2	10.885,241	1,0885
Total	21.482,993	2,1483

Mapa de Declividade						
Cor	De (%)	Até (%)	Área m ²	% m ²	Superfície m ²	% Sup
Amarelo	0%	2%	90,370m ²	0,16%	90,486m ²	0,16%
Amarelo-claro	2%	3%	28.855,428m ²	51,08%	28.871,911m ²	51,08%
Laranja	3%	4%	24.598,286m ²	43,55%	24.617,384m ²	43,55%
Vermelho	4%	8%	2.941,250m ²	5,21%	2.945,383m ²	5,21%
Total	Total	Total	56.485,314m ²			

Sistema de Coordenadas	
Coordenadas Planas Sistema UTM	
Origem das coordenadas:	
Elevação: 340,00	
N Equador ascendente de 10.000.000 m	
E 500 000 ascendente de 500.000 m	
Coordenadas Geodésicas do ponto: 48	
Latitude $\phi = 21^{\circ}29'20,342627''$ S	
Longitude $\lambda = 48^{\circ}18'26,048537''$ W	
Coeficiente de Escala: K = 1,002582186	

Figura 36 - Representação gráfica do mapa de declividade da área de estudo

ANEXO B – Intervalo Hídrico Ótimo

A qualidade física do solo é definida como a capacidade do solo em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O intervalo hídrico ótimo (IHO) tem sido proposto como um índice de qualidade estrutural do solo relacionado ao crescimento de culturas (SILVA et al., 1994) e está baseado no conceito introduzido por Letey (1985). O IHO foi definido como o intervalo de conteúdo de água no qual as limitações ao crescimento de plantas associadas ao potencial da água no solo, aeração e resistência mecânica à penetração das raízes são mínimas (SILVA et al. 2006b). No presente trabalho, foi determinado o IHO com o objetivo de avaliar qualidade física do solo para crescimento de raízes de cana-de-açúcar e determinar se a cultura teve restrições físicas durante o período de monitorado.

Para tal, foram estimados os valores críticos de conteúdo de água no solo que limitam o crescimento das raízes isto é: a) capacidade de campo (CC), estimada como o correspondente ao conteúdo de água ao potencial mátrico de 0,01 MPa, b) ponto de murcha permanente (PMP), estimado como o conteúdo de água correspondente ao potencial mátrico de 1,5 MPa, c) conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração é $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PA) e d) conteúdo de água no solo em que a resistência mecânica à penetração das raízes atinge 3 MPa (RP). O IHO foi determinado em cada camada do solo usando o algoritmo proposto por Leão et al. (2005), utilizando a informação obtida com os métodos apresentados nos itens 2.2.3.3 e 2.2.3.4.

Para determinar a resistência mecânica à penetração das raízes, depois de atingida a condição de equilíbrio na mesa de tensão e nas câmaras de pressão de Richards (item 2.2.3.3), cada amostra era pesada para determinar a massa do solo úmido. Posteriormente era submetida a um teste utilizando um penetrômetro eletrônico de laboratório, que possui uma agulha metálica que termina em um cone de 4 mm de diâmetro de base com ângulo de 60° e que desce com uma velocidade de 1 cm min^{-1} . Finalmente, determinava-se a massa do solo seco em estufa (item 2.2.3.3) e, com a densidade do solo, calculava-se o conteúdo volumétrico de água de cada amostra (θ). As determinações foram realizadas em cada uma das amostras indeformadas das distintas camadas.

A informação do IHO foi relacionada com a evolução do conteúdo de água de cada camada de solo obtida com o procedimento relatado no item 2.2.4.2. Além disso, utilizou-se a

metodologia proposta por Silva e Kay (2004) para quantificar a variabilidade temporal do conteúdo volumétrico de água no ciclo agrícola da cana-soca (processo natural) em relação a limites especificados do IHO (limites superior, θ_{superior} e inferior, θ_{inferior}). Da mesma forma que propuseram Silva e Kay (2004), os limites naturais do processo da variabilidade temporal de conteúdo volumétrico de água foram a média (μ) e o desvio-padrão (σ), dados por $\theta_{\mu} \pm 3\theta_{\sigma}$, em que θ_{μ} foi a média do conteúdo volumétrico de água de cada profundidade no ciclo agrícola de primeira soca e θ_{σ} foi o desvio-padrão do conteúdo volumétrico de água no mesmo período. O θ_{μ} e θ_{σ} foram calculados utilizando as 11 observações do perfil de umidade dos três tratamentos (item 2.2.4.2).

A tolerância específica do processo (TE), definida como a diferença entre os limites especificados (superior e inferior) foi calculada em unidades de desvio-padrão pela expressão: $TE = (\theta_{\text{superior}} - \theta_{\text{inferior}}) / \theta_{\sigma}$. A análise da capacidade foi utilizada para quantificar em o processo natural esteve centrado dentro dos limites do IHO. No presente estudo, foi utilizado para quantificar em termos de unidades de desvio-padrão, a diferença entre θ_{μ} e θ_{superior} e a diferença entre θ_{μ} e θ_{inferior} . A diferença (em unidades de desvio-padrão) entre θ_{μ} e θ_{superior} foi definida como $Z_s = (\theta_{\text{superior}} - \theta_{\mu}) / \theta_{\sigma}$ e, entre θ_{μ} e θ_{inferior} como $Z_i = (\theta_{\mu} - \theta_{\text{inferior}}) / \theta_{\sigma}$. A diferença mínima em relação ao nível especificado (DNS) foi definida como o mínimo entre os valores mencionados, i.e., $DNS = \text{mínimo}(Z_s, Z_i)$ (SILVA; KAY, 2004).

Na Figura 37, apresenta-se a evolução de θ no ciclo todo e os limites superior e inferior do IHO obtidos de cada camada estudada. Em todas as camadas os limites do intervalo hídrico ótimo foram a capacidade de campo ($\theta_{10\text{kPa}}$) e o conteúdo de água correspondente à resistência mecânica de 3 MPa à penetração das raízes ($\theta_{3\text{MPa}}$) os quais foram considerados como θ_{superior} e θ_{inferior} , respectivamente. Pode se observar que entre 0,25 e 0,55 m de profundidade o IHO foi menor, provavelmente pelo efeito do tráfego de maquinárias e por ser uma zona mais difícil de ser atingida nas operações de preparo do solo. Como a amostragem foi realizada nas entrelinhas, provavelmente na linha da soqueira o IHO seja maior considerando que a sulcação atingiu aproximadamente 0,35 m de profundidade.

No ciclo agrícola de cana-planta, Otto et al. (2009) encontraram que as raízes se concentraram ao redor do soquete diminuindo a porcentagem com a profundidade e com a

distância da linha de plantio. Os dados do IHO obtidos, explicam melhor porque aproximadamente 65% das raízes contidas em 0,6 m de profundidade concentraram-se nos primeiros 0,2 m e também explicam o menor enraizamento nas entrelinhas das soqueiras. Otto et al. (2009) também mostram que a fertilização nitrogenada no plantio modificou a distribuição das raízes favorecendo o crescimento perto da zona de aplicação do fertilizante. Destas observações pode-se inferir que em anos de precipitação maior do que a média histórica, como ocorreu neste caso, as plantas poderiam crescer sem limitações físicas e expressar seu potencial produtivo mas, em anos de restrição hídrica em que as raízes estão concentradas num volume pequeno do solo, o estresse hídrico pode limitar a produtividade da cultura (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

A variação temporal do conteúdo de água ($\theta_\mu \pm 3\theta_\sigma$) assim como os limites superior e inferior do IHO são apresentados na Figura 38. A variabilidade de θ foi maior na superfície que em profundidade, refletindo os efeitos da precipitação, evaporação e transpiração da cultura nas camadas superficiais. Nos casos em que o IHO é menor e a variabilidade de θ_μ maior, a probabilidade de que θ esteja fora dos limites estabelecidos aumenta.

A tolerância específica (TE) mostrou uma variabilidade considerável, sendo mínima na camada de 0,35 a 0,45 m e aumentando em profundidade em concordância com os maiores valores do IHO e menor variabilidade (Figura 39). Os valores oscilaram entre 1,8 e 4,2 com uma média de 3,0. Devido aos menores valores de TE na camada de 0,35-0,45 m a probabilidade de que o conteúdo de água esteja fora do IHO foi maior sendo a camada mais problemática do perfil de solo para crescimento de raízes. O TE nunca superou as 6 unidades de desvio-padrão, valor considerado o mínimo necessário para que o processo seja apropriado, mas segundo da Silva e Kay (2004) esse valor não pode ser considerado como um objetivo realista em agricultura de sequeiro.

O processo não esteve centrado entre os limites superior e inferior do IHO, observando-se que a umidade média esteve deslocada para o limite inferior sendo o caso mais evidente a camada de 0,35-0,45 m. Por tal motivo foram gerados, valores de θ fora do IHO como pode se observar na Figura 37. A média de Z_s foi 1,96 e a de Z_i foi 1,09. Como $Z_s > Z_i$, θ_μ esteve deslocado para o limite inferior do IHO, conseqüentemente, a resistência à penetração seria o atributo físico do solo que mais limita o crescimento de raízes neste solo. A afirmação é correta ao considerar que Z_i foi o limite utilizado para calcular DNS em todos os casos.

A variação do DNS com a profundidade é apresentada na Figura 40. O valor de DNS foi baixo em todas as profundidades sendo possível prever que valores de conteúdo de água no solo ficariam fora do IHO. O valores de DNS também indicaram que a camada mais desfavorável foi a de 0,35-0,45 m. Com o método utilizado foram registradas duas causas pelas quais o conteúdo de água esteve fora do IHO. A primeira razão foi que o θ_{superior} e o θ_{inferior} estiveram muito próximos, especialmente entre 0,25 e 0,55 m. Conseqüentemente, a variação natural do conteúdo de água ($\theta_{\mu} \pm 3\theta_{\sigma}$) excedeu os limites do IHO. A segunda razão de o conteúdo de água no solo ter ficado fora do IHO foi devido a que θ_{μ} não esteve no ponto médio do IHO ficando próximo do θ_{inferior} . Para superar estas limitações são necessárias práticas de manejo que aumentem o IHO assegurando melhores condições para o crescimento radicular.

Figura 37 - Variação temporal do conteúdo de água e limites superior e inferior do IHO nas diferentes camadas em estudo (continua)

Figura 37 - Variação temporal do conteúdo de água e limites superior e inferior do IHO nas diferentes camadas em estudo (conclusão)

Figura 38 - A variação temporal do conteúdo médio de água no solo ($\theta_{\mu} \pm 3\theta_{\sigma}$) e limites superior e inferior do IHO

Figura 39 - Tolerância específica (TE) nas diferentes profundidades

Figura 40 - Diferença mínima em relação ao limite especificado (DNS), definida como o mínimo entre os valores de Z_s e Z_i

ANEXO C – Análise estatística do balanço hídrico e da lixiviação de macronutrientes

Tabela 21 - Análise estatística dos componentes do balanço hídrico em diferentes períodos

Período Nº	Tratamento 1				Tratamento 2				Tratamento 3			
	ΔH (mm)	D/AC (mm)	ET _r (mm)	ET _r /dia (mm d ⁻¹)	ΔH (mm)	D/AC (mm)	ET _r (mm)	ET _r /dia (mm d ⁻¹)	ΔH (mm)	D/AC (mm)	ET _r (mm)	ET _r /dia (mm d ⁻¹)
1	...	-40,5 A	...	...	...	-47,9 A	...	...	...	-20,8 A	...	...
2	15,4 A	-13,0 A	-56,8 A	-2,8 A	10,7 A	-7,8 A	-66,7 A	-3,3 A	9,0	-1,8 A	-74,4 A	-3,7 A
3	2,4 B	-17,1 A	-21,7 A	-1,8 A	11,2 A	-18,0 A	-12,0 A	-1,0 A	10,4	-11,7 A	-19,1 A	-1,6 A
4	24,5 A	-107,9 A	348,3 A	-10,9 A	24,4 A	-122,3 A	-334,0 A	-10,4 A	28,4	-75,6 A	-376,8 A	-11,8 A
5	-21,0 A	-38,0 A	-76,6 A	-3,8 A	-20,9 A	-58,7 A	-55,9 A	-2,8 A	-24,9	-28,8 A	-89,7 A	-4,5 A
6	2,6 A	-30,8 A	-120,6 A	-5,5 A	4,4 A	-27,4 A	-122,2 A	-5,6 A	9,0	-23,4 A	-121,6 A	-5,5 A
7	-3,2 A	-19,3 A	-107,7 A	-5,1 A	-4,2 A	-25,2 A	-102,8 A	-4,9 A	-8,8	-16,1 A	-116,5 A	-5,5 A
8	-53,9 A	-14,2 A	-62,9 A	-2,2 A	-47,2 A	-13,8 A	-56,6 A	-2,0 A	-51,8	-9,9 A	-65,1 A	-2,3 A
9	38,3 AB	-2,1 A	-59,6 A	-1,7 A	22,2 B	-14,2 A	-63,6 A	-1,8 A	51,6	-2,2 A	-46,2 A	-1,3 A
10	-27,8 AB	-15,3 A	-24,7 AB	-0,9 AB	-11,2 A	-12,7 A	-10,8 A	-0,4 A	-37,8	-7,7 A	-42,3 B	-1,6 B
11	-20,6 A	-1,8 A	-18,8 A	-1,0 A	-26,7 A	-3,8 A	-22,9 A	-1,3 A	-19,9	-0,8 A	-19,1 A	-1,1 A
Total	-43,3 A	-300,0 A	-897,7 A	...	-37,3 A	-351,8 A	-847,5 A	...	-34,8 A	-198,8 A	-970,8 A	...

Médias seguidas da mesma em cada linha não são estatisticamente diferentes (teste LSD, $P < 0,1$).

Tabela 22 - Análise estatística da lixiviação macronutrientes (kg ha^{-1}) de plantas no solo em diferentes períodos. Valores positivos indicam ganhos e negativos perdas de macronutrientes na profundidade de 0,9 m

Período Nº	Tratamento 1						Tratamento 2						Tratamento 3					
	N	S	P	K	Ca	Mg	N	S	P	K	Ca	Mg	N	S	P	K	Ca	Mg
1	-1,2	-1,6	-0,1	-4,2	-6,6	-1,4	-2,0	-1,2	-0,6	-6,6	-7,0	-1,1	-0,4	-0,7	-0,1	-2,1	-5,0	-0,5
	AB	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A
2	-0,3	-0,5	-0,0	-2,7	-2,8	-0,7	-0,9	-0,1	-0,0	-3,9	-1,6	-0,3	-0,2	-0,1	-0,0	-0,6	-0,4	-0,1
	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
3	-0,2	-0,5	-0,0	-3,6	-4,9	-1,3	-2,2	-0,2	-0,0	-7,0	-6,5	-2,0	-0,6	-0,2	-0,0	-1,7	-2,2	-0,5
	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
4	-0,9	-2,3	-0,2	-18,9	-40,2	-10,8	-23,0	-1,3	-0,3	-27,7	-88,3	-28,0	-17,9	-1,2	-0,1	-14,9	-36,5	-9,9
	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	AB	A	A	A	A	A
5	-0,4	-1,2	-0,1	-2,5	-3,6	-0,6	-2,8	-0,6	-0,1	-2,9	-19,6	-5,5	-1,0	-1,4	-0,1	-2,3	-3,8	-0,7
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
6	-0,3	-0,8	-0,0	-1,5	-3,0	-0,5	-1,1	-0,4	-0,0	-1,5	-6,1	-1,7	-0,8	-1,4	-0,0	-2,6	-3,2	-0,6
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
7	-0,2	-0,5	-0,0	-0,9	-1,6	-0,3	-1,1	-0,3	-0,1	-1,8	-4,9	-1,3	-0,4	-0,8	-0,0	-1,5	-2,1	-0,4
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
8	-0,3	-0,5	0,0	-1,4	-1,2	-0,2	-0,5	-0,1	-0,1	-0,7	-1,5	-0,3	-0,2	-0,3	-0,0	-0,5	-1,1	-0,2
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
9	0,1	0,0	0,0	0,3	-0,2	0,0	-0,3	-0,2	-0,0	-0,5	1,5	0,7	-0,0	0,1	-0,0	0,2	-0,0	-0,0
	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A
10	-0,2	-0,5	-0,0	-1,0	-1,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,0	-0,8	-1,4	-0,3	-0,1	-0,2	-0,0	-0,3	-0,7	-0,1
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
11	0,0	0,0	-0,0	-0,0	-0,1	-0,0	-0,1	-0,0	-0,0	-0,2	-0,3	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-0,0
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A
Total	-3,9	-8,5	-0,4	-36,4	-65,4	-16,0	-34,3	-4,6	-1,2	-53,6	-135,7	-39,8	-21,6	-6,2	-0,3	-26,3	-55,0	-13,0
	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	AB	A	A	A	A

Médias seguidas da mesma em cada linha letra não são estatisticamente diferentes (teste LSD, $P < 0,1$). Tratamento 1: sem adubação de N e S nos ciclos de cana-planta e primeira soca. Tratamento 2: 80 kg ha^{-1} de N no ciclo de planta e, na primeira soca, 100 kg ha^{-1} de N e 114 kg ha^{-1} de S. Tratamento 3: 120 kg ha^{-1} de N no ciclo de planta e, na primeira soca, 150 kg ha^{-1} de N e 172 kg ha^{-1} de S. (†) No experimento foram aplicados 120 kg ha^{-1} de K_2O e P_2O_5 ; e 2 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico no ciclo de cana-planta e 120 kg ha^{-1} de K_2O na primeira soca.

ANEXO D – Equilíbrio iônico

Figura 41 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 1: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 42 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 2: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

Figura 43 - Equilíbrio iônico das amostras de solução do solo representada pela soma de cátions e ânions de cada extrator no Tratamento 3: (a) Bloco I; (b) Bloco II; (c) Bloco III e (d) Bloco IV

ANEXO E – Temperatura do solo

Figura 44 - Temperatura do solo em diferentes profundidades no ciclo agrícola monitorado. Cada leitura corresponde à média de duas leituras de termômetros localizados em duas parcelas experimentais