



LEONARDO NAZÁRIO SILVA DOS SANTOS

# **IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR COM ESGOTO TRATADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

**CAMPINAS**

**2014**





UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

LEONARDO NAZÁRIO SILVA DOS SANTOS

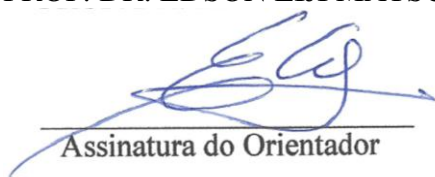
## **IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR COM ESGOTO TRATADO POR GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na Área de Concentração de Água e Solo.

Orientador: Prof. Dr. EDSON EIJI MATSURA

Co-Orientadora: Profa. Dra. REGINA CÉLIA DE MATOS PIRES

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO LEONARDO  
NAZÁRIO SILVA DOS SANTOS, E ORIENTADO PELO  
PROF. DR. EDSON EIJI MATSURA.



Assinatura do Orientador

**CAMPINAS**

**2014**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Sa59i Santos, Leonardo Nazário Silva dos, 1984-  
Irrigação da cana-de-açúcar com esgoto tratado por gotejamento  
subsuperficial / Leonardo Nazário Silva dos Santos. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Edson Eiji Matsura.  
Coorientador: Regina Célia de Matos Pires.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Agrícola.

1. Água residuária. 2. Reflectometria no domínio do tempo (TDR). 3.  
Saccharum officinarum . 4. Sistema radicular. 5. Manejo da irrigação. I. Matsura,  
Edson Eiji, 1956-. II. Pires, Regina Célia de Matos. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Sugarcane production using treated sewage applied by subsurface  
drip irrigation

**Palavras-chave em inglês:**

Wastewater

Time domain reflectometry (TDR)

Saccharum officinarum

Root system

Irrigation management

**Área de concentração:** Água e Solo

**Titulação:** Doutor em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**

Edson Eiji Matsura [Orientador]

Tamara Maria Gomes

Rubens Duarte Coelho

Claudinei Fonseca Souza

Roberto Testezlaf

**Data de defesa:** 16-05-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola

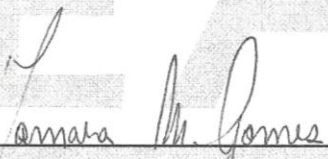


Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Leonardo Nazário Silva dos Santos**, aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de maio de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



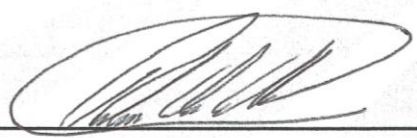
---

**Prof. Dr. Edson Eiji Matsura – Presidente e Orientador**  
**Feagri/Unicamp**



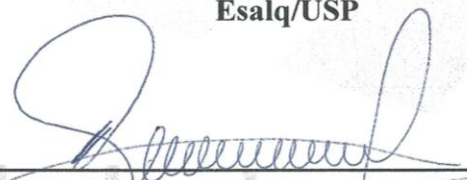
---

**Profa. Dra. Tamara Maria Gomes - Membro Titular**  
**FZEA/USP**



---

**Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho – Membro Titular**  
**Esalq/USP**



---

**Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza - Membro Titular**  
**UFSCar**



---

**Prof. Dr. Roberto Testezlaf - Membro Titular**  
**Feagri/Unicamp**



## RESUMO

A agricultura irrigada é a atividade caracterizada pelo alto consumo de água. Nesse contexto, a utilização de efluente de esgoto tratado (EET) como fonte de água para a irrigação pode ser uma alternativa para substituição de água doce, mas que requer estudos específicos para adoção e uso de forma sustentável. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de EET via gotejamento subsuperficial sobre as propriedades físicas do solo (Latosolo Vermelho distroférico), distribuição da umidade no perfil do solo, desenvolvimento do sistema radicular, a produção de colmos e a qualidade tecnológica do caldo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). O experimento foi instalado em Campinas-SP, Brasil, adotando-se delineamento em blocos casualizados em esquema fatorial 2x2x2+1, com cinco repetições. Os fatores estudados foram: duas profundidades de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m); duas qualidades de água (efluente de esgoto tratado – EET, e água de reservatório superficial – ARS); complementação nutricional via fertirrigação (com complementação nutricional – CN, e sem complementação nutricional – SN); e a testemunha sem irrigação. Para avaliação da umidade no perfil do solo foi utilizada a técnica da TDR (*Time Domain Reflectometry*); para a avaliação radicular foi utilizado o sistema *minirhizotron*; para determinar os atributos físicos do solo foram utilizadas amostras deformadas e indeformadas; e a produtividade estimada por biometria. O uso de efluente de esgoto tratado como fonte hídrica na irrigação demonstrou ser opção sustentável do ponto de vista agrônomo, proporcionando incrementos na produtividade e melhoria na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em relação ao tratamento sem irrigação. A instalação do tubo gotejador a 0,2 m de profundidade disponibilizou água na região de maior desenvolvimento radicular e reduziu as perdas de água por evaporação e por percolação profunda. Os fatores testados não alteraram significativamente os parâmetros sódico-salinos, as propriedades físicas do solo e o comprimento radicular da cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** água residuária; reflectometria no domínio do tempo (TDR); *Saccharum officinarum* L.; sistema radicular; manejo da irrigação.



## ABSTRACT

Irrigated agriculture is characterized by higher water consumption. In this context, the use of treated sewage effluent (TSE) as a water resource for irrigation can be an alternative in replacing freshwater, however it requires specific studies for adoption and as well as for sustainable use. Therefore, this study aimed to evaluate the TSE subsurface drip irrigation effect on a dystrophic Red Latossolo (Oxisol) physical properties, the effect on the moisture distribution in the soil profile, on the root system development, as well as on the yielding and quality of produced sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). The experiment was carried out in Campinas-SP, Brazil, adopting a randomized block design in a 2x2x2+1 factorial, with five replications. Studied factors included: two depths of the dripline (0.2 to 0.4 m); two water qualities (treated sewage effluent – TSE, and surface reservoir water – SRW); nutritional supplementation by fertigation (with nutritional supplementation – NS, and without nutritional supplementation - WNS); and no irrigation (NI). To evaluate the moisture in the soil profile it was used the technique named TDR (Time Domain Reflectometry); to evaluate root development was used the system known as minirhizotron; to determine soil physical properties it was employed disturbed and undisturbed samples; and productivity estimated by biometrics. The use of treated sewage effluent as a water resource for irrigation proved to be a sustainable option through the agronomic point of view, providing productivity increases and improvement of technological quality of sugarcane compared to treatment without irrigation. The installation of the dripline to 0.2 m depth provided of water in the region highest root development and reduced water losses by evaporation and deep percolation. The tested factors did not significantly alter the sodic-saline parameters, the physical properties of soil and root length of sugarcane.

**Key Words:** wastewater; Time Domain Reflectometry (TDR); *Saccharum officinarum* L.; root system; irrigation management.



## SUMÁRIO

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                       | 1  |
| 2. HIPÓTESES .....                                                                        | 4  |
| 3. OBJETIVOS .....                                                                        | 5  |
| 3.1 Objetivo geral.....                                                                   | 5  |
| 3.2 Objetivos Específicos .....                                                           | 5  |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                                            | 6  |
| 4.1 Cana-de-açúcar .....                                                                  | 6  |
| 4.1.1 Sistema radicular .....                                                             | 7  |
| 4.1.2 Irrigação e adubação.....                                                           | 13 |
| 4.2 Emprego de água residuária de esgoto doméstico na agricultura .....                   | 16 |
| 4.2.1 Uso da irrigação localizada na aplicação de efluente de esgoto doméstico .....      | 20 |
| 4.3 Efluente de esgoto tratado aplicado sobre a cana-de-açúcar: avaliações no Brasil..... | 28 |
| 4.4 Técnica TDR na estimativa do conteúdo de água no solo .....                           | 30 |
| 4.5 Salinidade e sodicidade do solo.....                                                  | 34 |
| 5. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                | 40 |
| 5.1 Localização e clima .....                                                             | 40 |
| 5.2 Caracterização da área experimental .....                                             | 41 |
| 5.3 Variedade de cana-de-açúcar .....                                                     | 46 |
| 5.4 Delineamento experimental .....                                                       | 46 |
| 5.4.1 Sistema de irrigação e plantio .....                                                | 48 |
| 5.4.2 Qualidade da água de irrigação.....                                                 | 50 |
| 5.4.3 Adubação e fertirrigação .....                                                      | 52 |
| 5.5 Manejo de irrigação e tratos culturais.....                                           | 53 |
| 5.6 Avaliações .....                                                                      | 56 |
| 5.6.1 Monitoramento do conteúdo de água no perfil do solo.....                            | 56 |
| 5.6.2 Caracterização da salinidade e sodicidade no perfil do solo .....                   | 58 |
| 5.6.3 Caracterização dos atributos físicos no perfil do solo.....                         | 59 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.6.4 Caracterização dos parâmetros vegetativos da cana-de-açúcar ..... | 60  |
| 5.6.4.1 Sistema radicular .....                                         | 60  |
| 5.6.4.2 Análise tecnológica e produtividade.....                        | 62  |
| 5.7 Análise dos resultados .....                                        | 63  |
| 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                          | 64  |
| 6.1 Conteúdo de água no perfil do solo .....                            | 64  |
| 6.2 Salinidade e sodicidade no perfil do solo .....                     | 74  |
| 6.3 Atributos físicos, PST e CE no perfil do solo .....                 | 80  |
| 6.4 Parâmetros vegetativos da cana-de-açúcar .....                      | 98  |
| 6.4.1 Sistema radicular.....                                            | 98  |
| 6.4.2 Atributos tecnológicos e produtividade da cana-de-açúcar .....    | 103 |
| 7. CONCLUSÕES .....                                                     | 112 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                     | 113 |
| 9. ANEXOS.....                                                          | 128 |
| 9.1 Fertirrigação mensal: cana planta e 1ª soca .....                   | 128 |
| 9.2 Salinidade e sodicidade do solo.....                                | 134 |
| 9.3 Desempenho tecnológico e produtividade da cana-de-açúcar .....      | 137 |



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por abençoar e iluminar meus passos.

Aos meus pais, José Antônio e Ana Maria, ao meu irmão Lucas, à minha avó Maria, meus Tios Zé, Chico e Cirlene, que sempre estiverem ao meu lado mesmo quando eu estava distante.

À minha esposa Glenda, pelo amor e carinho a mim dedicados e pela compreensão nos momentos difíceis dessa trajetória.

Ao Prof. Dr. Edson E. Matsura, pela amizade, orientação, aprendizado, compreensão e confiança em mim depositados.

À Profa. Dra. Regina C. de M. Pires, pela amizade, co-orientação, participação ativa em diversas etapas deste trabalho, valiosos ensinamentos e numerosos conselhos.

Aos professores membros da banca examinadora (Prof. Dr. Claudinei F. Souza – CCA/UFSCar, Prof. Dr. Roberto Testezlaf – FEAGRI/UNICAMP, Prof. Dr. Rubens D. Coelho – ESALQ/USP e Profa. Dra. Tamara M. Gomes – FZEA/USP) pelas valiosas observações e contribuições para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos que muito contribuíram para o início deste projeto: Allan C. M. de Sousa, Gustavo S. Souza, Marcelo L. C. Elaiuy.

Ao “grupo cana FEAGRI”: Aline A. Nazário, Daniel R. C. Feitosa, Eduardo A. A. Barbosa, Ivo Z. Gonçalves e Natalia F. Tuta. Amigos tão importantes quanto eu na realização desta obra.

Às amizades construídas ao longo destes anos: Adriana, Ana Elisa, Camila, Diego, Diogo, Douglas, Fábio, Fernando, Flávia, Franciana, Gabriela, Guilherme, Haroldo, Henrique, Klebson, Leandro Barros, Luís Fernando “Bixinho”, Luiz, Marcelão, Márcio, Marlus, Maycon, Michender, Milla, Monalisa, Rafael Barbosa, Rafael Leme, Rafael Mora, Rhuanito, Romeu, Roni, Rose, Tomaz, pelo apoio, otimismo e alegria compartilhados.

Aos amigos do IAC (Instituto Agronômico de Campinas) pelo auxílio incondicional e pelas valiosas “dicas de rodapé”: André, Augusto, Cida e ao Xará Léo.

Ao Programa de Pós-Graduação da FEAGRI/UNICAMP, em nome de seus funcionários Célia R. de Carvalho, Fábio E. D. Augusto, Marta A. R. Vechi, Rita de C. C. Ferreira, Sidnei de J. Trombeta e coordenadores Luiz H. A. Rodrigues e Zigomar M. de Souza pelo acolhimento, oportunidade em desenvolver este trabalho e dedicação irrestrita.

Aos laboratoristas Célia, Giovani, Júnior, Leandro, Rosa Helena, Sérgio e, em especial, a Gelson E. da Silva e Túlio A. P. Ribeiro, que sempre contribuíram com seus conhecimentos técnico-científicos para o desenvolvimento desta obra.

Aos funcionários do campo experimental (Carlão, Sr. Freire, Jamilson, João e Pequeno) e da oficina mecânica (Chicão, Devis, José Maria e Luís), pelo apoio incondicional.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Processo nº 141.487/2010-0) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Processo nº 2010/15382-8) pela concessão da bolsa de estudos e à FAPESP pelo financiamento do projeto de pesquisa (Processo nº 2011/07301-0).

À Usina Costa Pinto pela doação da cana semente e à Usina Ester pela realização das análises tecnológicas da cana-de-açúcar.

Ao CPQBA (Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas da UNICAMP), em nome do Pesquisador Ilio Montanari Junior, pelo empréstimo do sulcador para o plantio da cana-de-açúcar.

Finalmente, agradeço a todos que direta ou indiretamente compartilharam para o êxito deste trabalho.

Muito obrigado!!!

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”

*Antoine-Laurent de Lavoisier*

“Tomar água nos dá vida, tomar consciência nos dá água.”

Autor desconhecido

“Que a consciência em preservar os recursos hídricos possa inspirar o desenvolvimento sustentável, minimizando sua degradação e garantindo água em qualidade e quantidade a toda sociedade.”



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Sistema de aquisição de imagem <i>minirhizotron</i> . (Fonte: adaptado de PATEÑA e INGRAM, 2000).....                                                                                                                                                                                                                                          | 12 |
| <b>Figura 2.</b> Produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar (%) em função da CE (condutividade elétrica, $\text{dS m}^{-1}$ ) do extrato de saturação do solo e da CE da água de irrigação. (Fonte: adaptado de AYERS e WESTCOT, 1994).....                                                                                                           | 36 |
| <b>Figura 3.</b> Dados mensais de precipitação, evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> – estimado pelo método de Pennam-Montheith) e temperatura média observada no decorrer da cana planta (maio/2011 a setembro/2012) e 1ª soca (outubro/2012 a agosto/2013) de cana-de-açúcar, Campinas-SP. ....                                                   | 41 |
| <b>Figura 4.</b> Curva de retenção de água no solo ajustada conforme modelo de Van Genuchten (1980) para cinco diferentes camadas avaliadas em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP .....                                                                                                                                                              | 44 |
| <b>Figura 5.</b> Croqui da área experimental e disposição dos tratamentos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 48 |
| <b>Figura 6.</b> Sulcador regulado para plantio da cana-de-açúcar em fileiras duplas de 0,4 m (a); instrumento para instalação do tubo gotejador em duas profundidades: 0,2 e 0,4 m (b); espaçamento filas duplas (c); espaçamento entre filas duplas (d).....                                                                                                  | 49 |
| <b>Figura 7.</b> Cabeçal de controle com dois conjuntos de pressurização do sistema de irrigação: aplicação de água de reservatório superficial (a); aplicação de efluente de esgoto tratado (b).....                                                                                                                                                           | 50 |
| <b>Figura 8.</b> Sistema de tratamento de esgoto da FEAGRI/UNICAMP. (Fonte: adaptado de ZANELLA, 2008).....                                                                                                                                                                                                                                                     | 51 |
| <b>Figura 9.</b> Lâmina mensal de irrigação para oito diferentes tratamentos empregados no decorrer da cana planta e 1ª soca.....                                                                                                                                                                                                                               | 55 |
| <b>Figura 10.</b> Sonda TDR utilizada na experimentação .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 56 |
| <b>Figura 11.</b> Sondas TDR instalados na área SE: vista do perfil (a) e vista superior (b) .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |
| <b>Figura 12.</b> Pontos de instalação das sondas TDR (a); tradagem para abertura de orifícios em maiores profundidades (b); inserção de ferramenta específica para o enterrio das sondas em maiores profundidades (c); visualização dos cabos coaxial após enterrio das sondas TDR (d); suporte e proteção dos conectores (e).....                             | 57 |
| <b>Figura 13.</b> Ponto de coleta de amostras deformadas e indeformadas no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 59 |
| <b>Figura 14.</b> Ferramentas para instalação dos tubos de acrílico: gabarito (a); gabarito com broca formando ângulo de 45° (b).....                                                                                                                                                                                                                           | 61 |
| <b>Figura 15.</b> Esquema do tubo de acrílico instalado no solo e escâner CI-600.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 62 |
| <b>Figura 16.</b> Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível (f, adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                                                                | 68  |
| <b>Figura 17.</b> Distribuição espacial da porcentagem de sódio trocável (PST, %) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                                   | 84  |
| <b>Figura 18.</b> Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo (CE, dS m <sup>-1</sup> ) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                 | 86  |
| <b>Figura 19.</b> Distribuição espacial da densidade do solo (Ds, g cm <sup>-3</sup> ) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                              | 88  |
| <b>Figura 20.</b> Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) no perfil do solo ...                                                                                                                                                                                                                                                         | 89  |
| <b>Figura 21.</b> Distribuição espacial do índice de estabilidade de agregado (IEA, %) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                              | 90  |
| <b>Figura 22.</b> Distribuição espacial do grau de dispersão (GD, %) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 91  |
| <b>Figura 23.</b> Distribuição espacial da porosidade total (PT, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                                 | 92  |
| <b>Figura 24.</b> Distribuição espacial da macroporosidade (Macro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                               | 93  |
| <b>Figura 25.</b> Distribuição espacial da microporosidade (Micro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) no perfil do solo .....                                                                                                                                                                                                                               | 94  |
| <b>Figura 26.</b> Número de perfilhos por metro para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita) .....                                                                                                                                                                                                                   | 99  |
| <b>Figura 27.</b> Densidade de comprimento radicular (DCR) em quatro camadas no perfil do solo (0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,45; e 0,45-0,6 m) para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita) .....                                                                                                                         | 100 |
| <b>Figura 28.</b> Porcentagem acumulada de raízes no perfil do solo para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita) .....                                                                                                                                                                                               | 102 |
| <b>Figura 29.</b> Número de perfilhos por metro no decorrer do cultivo da cana planta e 1ª soca de cana-de-açúcar .....                                                                                                                                                                                                                                     | 104 |
| <b>Figura 30.</b> Resultado das análises de Brix (Teor de sólidos solúveis do caldo, °Brix) e Pol (Teor de sacarose aparente do caldo, %) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) de cana-de-açúcar ..... | 105 |
| <b>Figura 31.</b> Resultado das análises de Pureza (Pureza aparente do caldo, %) e AR (Açúcares redutores do caldo, %) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragem, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragem, respectivamente) de cana-de-açúcar .....                      | 106 |
| <b>Figura 32.</b> Resultado das análises de Fibra (Fibra da cana-de-açúcar, %) e ATR (Açúcar total recuperável, kg ha <sup>-1</sup> ) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) de cana-de-açúcar .....     | 107 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Fatores para escolha do método de irrigação no uso de águas residuárias .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 22 |
| <b>Tabela 2.</b> Classificação da água de irrigação em relação ao potencial de risco de entupimento do gotejador.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 24 |
| <b>Tabela 3.</b> Classificação das plantas quanto aos limites de tolerância à salinidade em função da quantidade de sais presentes na solução do solo ou na água de irrigação.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 35 |
| <b>Tabela 4.</b> Temperatura (mínima, média e máxima) e precipitação acumulada (média) observadas na estação meteorológica situada na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP entre junho/1988 e outubro/2008. ....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 40 |
| <b>Tabela 5.</b> Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à composição granulométrica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e grau de dispersão (GD, %), Campinas-SP.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 42 |
| <b>Tabela 6.</b> Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à densidade de partícula ( $D_p$ , $\text{g cm}^{-3}$ ), densidade do solo ( $D_s$ , $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (Macro, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), microporosidade (Micro, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), porosidade total (PT, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ , $\text{cm h}^{-1}$ ), Campinas-SP.....                                      | 42 |
| <b>Tabela 7.</b> Caracterização inicial do solo da área experimental quanto ao diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e índice de estabilidade de agregados (IEA, %), Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 43 |
| <b>Tabela 8.</b> Caracterização inicial da área experimental quanto à resistência e à penetração do solo (RP, MPa) e conteúdo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), Campinas-SP.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 45 |
| <b>Tabela 9.</b> Caracterização inicial da área experimental quanto à fertilidade do solo na camada superficial (0-0,2 m) antes da instalação do experimento, Campinas-SP.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 45 |
| <b>Tabela 10.</b> Caracterização inicial da área experimental quanto aos parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo Richards (1954), Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| <b>Tabela 11.</b> Descrição dos tratamentos empregados na área experimental .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 47 |
| <b>Tabela 12.</b> Média mensal da análise química da água de reservatório superficial (ARS) e do efluente de esgoto tratado (EET) utilizados na irrigação da cana planta e 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 52 |
| <b>Tabela 13.</b> Lâmina precipitada (LP, mm), lâmina de água de reservatório superficial (ARS, mm) e de efluente de esgoto tratado (EET, mm) aplicado via irrigação por gotejamento subsuperficial no ciclo da cana planta e da 1ª soca, Campinas-SP .....                                                                                                                                                                                                                                      | 64 |
| <b>Tabela 14.</b> Conteúdo de água no perfil do solo (0-1,0 m de profundidade) antes ( $\theta_i$ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), em déficit ( $\theta_d$ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e em excesso ( $\theta_e$ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e fração de água teórica disponível (f, adimensional) para nove tratamentos no ciclo da cana planta e 1ª soca em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP..... | 65 |
| <b>Tabela 15.</b> Porcentagem de sódio trocável (PST, %) e pH do solo em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, e água de reservatório superficial – ARS) e da profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) no final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.....                                                                                                                                          | 75 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 16.</b> Parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo critérios estabelecidos por Richards (1954) para início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 76  |
| <b>Tabela 17.</b> Porcentagem de sódio trocável (PST, %), condutividade elétrica (CE, dS m <sup>-1</sup> ), densidade do solo (Ds, g cm <sup>-3</sup> ) e diâmetro médio de poros (DMP, mm) em cinco diferentes camadas de solo (0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.....                                                                                                | 80  |
| <b>Tabela 18.</b> Índice de estabilidade de agregados (IEA, %), grau de dispersão (GD, %), porosidade total (PT, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), microporosidade (Micro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) e macroporosidade (Macro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) em cinco diferentes camadas de solo (0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.....               | 81  |
| <b>Tabela 19.</b> Porcentagem de distribuição (%) dos parâmetros porcentagem de sódio trocável (PST, %), condutividade elétrica (CE, dS m <sup>-1</sup> ) e densidade do solo (Ds, g cm <sup>-3</sup> ), diâmetro médio de poros (DMP, mm), índice de estabilidade de agregados (IEA, %) e grau de dispersão (GD, %) em três diferentes classes observadas no perfil (0-1,0 m) de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, Campinas-SP. .... | 82  |
| <b>Tabela 20.</b> Porcentagem de distribuição (%) dos parâmetros porosidade total (PT, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ), microporosidade (Micro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) e macroporosidade (Macro, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) em três diferentes classes observadas no perfil (0-1,0 m) de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, Campinas-SP .....                                                                   | 83  |
| <b>Tabela 21.</b> Conteúdo de água no solo (kg kg <sup>-1</sup> ) para quatro pontos de amostragem (na projeção do tubo gotejador e em 3 pontos paralelos ao mesmo: 0,0; 0,2; 0,4; e 0,6 m, respectivamente) e em quatro camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; e 0,3-0,4 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. ....                                                                                                       | 96  |
| <b>Tabela 22.</b> Resistência do solo à penetração (RP, Mpa) para quatro pontos de amostragem (na projeção do tubo gotejador e em 3 pontos paralelos ao mesmo: 0,0; 0,2; 0,4; e 0,6 m, respectivamente) e em quatro camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; e 0,3-0,4 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. ....                                                                                                            | 97  |
| <b>Tabela 23.</b> Condutividade hidráulica do solo saturado (Ks, cm h <sup>-1</sup> ) em cinco diferentes camadas de solo (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) na projeção do tubo gotejador (Ponto 0,0) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.....                                                                                                                                                              | 98  |
| <b>Tabela 24.</b> Estimativa de produção de colmos de cana-de-açúcar (EPC, t ha <sup>-1</sup> ) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, t ha <sup>-1</sup> ) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS) e da fertirrigação (com ou sem) no ciclo da cana planta (482 dias após o plantio) em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. ....                                 | 109 |
| <b>Tabela 25.</b> Estimativa de produção de colmo (EPC, t ha <sup>-1</sup> ) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, t ha <sup>-1</sup> ) para nove tratamentos no ciclo da cana planta e 1ª soca em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                     | 110 |
| <b>Tabela 26.</b> Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Efluente de Esgoto Tratado (EET) no ciclo da cana planta, Campinas-SP. ....                                                                                                                                                                                                                                                      | 128 |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 27.</b> Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Água de Reservatório Superficial (ARS) no ciclo da cana planta, Campinas-SP .....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 130 |
| <b>Tabela 28.</b> Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Efluente de Esgoto Tratado (EET) no ciclo da 1ª soca de cana-de-açúcar, Campinas-SP.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 132 |
| <b>Tabela 29.</b> Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Água de Reservatório Superficial (ARS) no ciclo da 1ª soca de cana-de-açúcar, Campinas-SP .....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 133 |
| <b>Tabela 30.</b> Análise de variância para pH, condutividade elétrica (CE), porcentagem de sódio trocável (PST, %) e razão de absorção de sódio (RAS, $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) no início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.....  | 134 |
| <b>Tabela 31.</b> Análise de variância para estimativa de produção de colmo (EPC, $\text{t ha}^{-1}$ ) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, $\text{t ha}^{-1}$ ) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) para dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. .... | 137 |



## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente o crescimento demográfico leva a uma maior necessidade de produção de alimentos, fato que tende a forçar o aumento das áreas agricultáveis e a produtividade. Além disso, a produção de bioenergia em sistemas de produção sustentável também apresenta importância fundamental nos dias atuais. Entretanto, as condições de solo e clima das áreas para expansão nem sempre são aptas à produção agrícola, sendo frequentemente consideradas marginais devido à baixa disponibilidade hídrica e à pouca fertilidade, topografia e clima, dentre outros fatores. Deste modo, o uso da agricultura irrigada é uma técnica que pode atender a demanda por produtos agrícolas (LIMA, 2001), já que esse sistema de cultivo é responsável por 40% da totalidade de alimentos produzidos em apenas 20% da área mundial agricultada (TURRAL et al., 2011).

No Brasil, o consumo total de água pelo setor agropecuário na década de 80 era cerca de 29,5% do total em relação aos outros usos (BARTH, 1987), valor que atualmente é da ordem de 72% (ANA, 2012). Além disso, atrelado ao aumento populacional, ao desenvolvimento econômico e à demanda de água por outros setores da sociedade, há um crescente aumento na utilização dos recursos hídricos e, com isso, acréscimo no volume de esgoto gerado, implicando em degradação da qualidade da água e, conseqüentemente, impactos ambientais nos recursos hídricos (lagos e rios, principalmente).

Turral et al. (2011) indicam que, desde a década de 60 até os dias atuais, o uso agrícola das terras aumentou em 12% (de 1.368 para 1.527 milhões de ha), observando aumento de 117% para áreas cultivadas sob irrigação (de 139 para 301 milhões de ha) e decréscimo de 0,2% para cultivos em sequeiro (1.229 para 1.226 milhões de ha). Assim, considerando o volume de água utilizado pela agricultura irrigada (ANA, 2012), nota-se que seu uso precisa ser eficiente a fim de manter-se ambientalmente sustentável. Neste contexto, é fundamental que sejam elaboradas pesquisas relacionadas à estrutura da irrigação, seleção de cultivo e do manejo de irrigação, gestão racional e integrada da água, uso de águas de qualidade inferior e, ainda, avaliar a eficiência dos sistemas de irrigação já implantados.

Dentre os sistemas de irrigação existentes, a irrigação localizada por gotejamento é a que apresenta potencial para maximizar a eficiência de aplicação de água e nutrientes (a partir da fertirrigação). Tal sistema pode ser utilizado de duas formas: na superfície ou enterrado, também conhecida como irrigação subsuperficial (BARROS et al., 2009). Diversos pesquisadores

mencionam que esta última opção apresenta-se viável e eficiente na busca pelo aumento de produção de alimentos e bioenergia, o que se deve às vantagens que o gotejamento enterrado apresenta em relação à aplicação de água superficial, tais como: flexibilidade do uso de maquinário agrícola; dificuldade na germinação de sementes de plantas infestantes, uma vez que o solo se mantém seco na superfície (SOUZA et al., 2007; BARROS et al., 2009); aumento na eficiência de irrigação, pois a água é aplicada ao solo em pequenas quantidades e diretamente na região radicular, com alta frequência, mantendo o conteúdo de água do solo nessa região próximo à capacidade de campo (SOUZA e MATSURA, 2004). Além disso, o fato da irrigação enterrada aplicar água diretamente na zona radicular possibilita a utilização de águas residuais, pois reduz o risco de transmissão de doenças e contaminação do operador, além de minimizar as perdas de água por evaporação (LAMM e CAMP, 2007).

A procedência da água de irrigação é muito variável, podendo-se utilizar água de rios, lagos, córregos, água subterrânea e, ainda, água residuária. Esta última se destaca por ser um recurso reutilizado proveniente de diferentes setores da sociedade, seja o urbano, o industrial ou agrícola. Considerando o aumento da demanda de água pelos diversos setores da sociedade, a necessidade de produção de alimentos e de bioenergia, o efluente de esgoto tratado (EET) torna-se uma opção para o uso na irrigação, principalmente quando as áreas irrigadas se encontram próximas aos centros urbanos e pela possibilidade de se alcançar sustentabilidade ambiental. Além disso, quando comparado aos sistemas de irrigação que aplicam água na superfície do solo, o uso de EET via irrigação por gotejamento subsuperficial diminui o odor desagradável proporcionado pela decomposição do material orgânico presente.

Segundo Sandri et al. (2006), o emprego de EET na agricultura está aumentando a cada ano em muitos países, inclusive no Brasil. Isso se deve à insuficiência hídrica, às leis ambientais mais rigorosas e atuantes, ao maior controle da poluição ambiental (com redução de problemas à saúde humana e animal), a diminuição dos custos de tratamento devido à atuação do solo como alternativa para disposição e fornecimento de nutrientes e matéria orgânica às plantas, reduzindo os custos com fertilizantes químicos comerciais (SANDRI, 2003). Outro aspecto interessante e que torna a irrigação com EET atrativa é a possibilidade de liberação de recursos hídricos de melhor qualidade para outras atividades da sociedade, como o consumo humano e a dessedentação de animais.

Salienta-se que a utilização de EET pode ser uma opção técnica-econômica viável para irrigação de diversas culturas, principalmente de culturas extensivas e de importância mundial como a cana-de-açúcar. O que se deve à crescente demanda nacional e internacional por etanol e açúcar, resultando no aumento da área plantada no Brasil (LEAL et al., 2009a) ou ainda no aumento da produtividade associado à adoção de técnicas como a irrigação (PIRES et al., 2010; BARBOSA et al., 2012).

Ainda que exista um grande potencial de uso, vale ressaltar que a aplicação frequente de efluentes na agricultura pode apresentar aspectos negativos no que diz respeito às interações do efluente com o solo, a planta e aos recursos hídricos subterrâneos, como por exemplo: adição de sódio em excesso, salinização, instabilidade de agregados, fluxo de soluções, perda da permeabilidade do solo, compactação, entre outros. Deve-se considerar que a falta de estudos para as condições edafoclimáticas tropicais, com características distintas das zonas áridas e temperadas, justifica o desenvolvimento de estudos, uma vez que os resultados obtidos servirão de base para o estabelecimento de critérios técnico-científicos, visando à adequação do uso do solo às práticas de irrigação com EET e considerando a sustentabilidade ambiental. Desta forma, cuidados especiais são necessários para se aplicar EET via irrigação, seja com relação ao monitoramento físico, químico e biológico da água e do solo, com relação à distribuição desse tipo de água (com qualidade inferior) no perfil do solo e lixiviação para o lençol freático.

Portanto, o monitoramento e o estudo do conteúdo de água, condutividade elétrica e salinização no perfil do solo e, também, os índices de crescimento da cultura a ser irrigada (como parâmetros tecnológicos, produtividade e sistema radicular) são fundamentais, já que fornecem informações relevantes quanto à relação entre o sistema de manejo adotado e a atual condição das plantas, permitindo, dessa forma, realizar tomada de decisão para melhoria e adequação dos tratamentos culturais empregados.

## **2. HIPÓTESES**

1. O uso de efluente de esgoto tratado na irrigação por gotejamento em cana-de-açúcar consiste em opção sustentável do ponto de vista agronômico e ambiental;
2. A cana-de-açúcar cultivada em solo de alta fertilidade apresenta aumento de produtividade quando irrigada por gotejamento utilizando efluente de esgoto tratado, mesmo em regiões úmidas com clima de transição entre Cwa e Cfa segundo classificação de Köppen;
3. Existe uma profundidade adequada de instalação do tubo gotejador na irrigação subsuperficial, de modo a minimizar as perdas de água por evaporação e por percolação profunda.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Contribuir para o entendimento dos efeitos do uso de efluente de esgoto tratado aplicado via irrigação subsuperficial sobre as propriedades físicas do solo e parâmetros vegetativos da cultura da cana-de-açúcar.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

A partir dos diferentes tratamentos adotados objetivou-se:

1. Avaliar o uso de tubos gotejadores em duas profundidades de instalação para aplicação de EET e água de reservatório na cultura da cana-de-açúcar, submetidos ou não à fertirrigação;
2. Verificar o efeito do EET sobre os atributos físicos, salinidade e sodicidade no perfil do solo;
3. Avaliar o sistema radicular da cana-de-açúcar; e
4. Avaliar a cultura da cana-de-açúcar utilizando a análise biométrica, de qualidade tecnológica e produtividade.

#### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Desde a época das capitanias hereditárias a cultura da cana-de-açúcar é considerada importante para o crescimento econômico e social do Brasil. Atualmente, a necessidade de produção de biocombustível proporciona aumento da área cultivada com cana e, com isso, substituição ou deslocamento de culturas alimentícias (como milho, soja, feijão, entre outras) para regiões distantes dos centros comerciais ou plantio em terras com menor aptidão agrícola (proporcionando aumento dos custos com insumos e transporte). Assim, existe a necessidade de otimizar a produção na área cultivada, evitando a substituição de culturas destinadas à alimentação. Nesse sentido, o uso da técnica da irrigação com água de qualidade inferior (por exemplo, efluente de esgoto tratado – EET), surge como alternativa para emprego e verticalização do cultivo da cana-de-açúcar.

O uso de águas residuárias pode incrementar o total de áreas irrigadas, proporcionar melhoria da qualidade do produto, redução de áreas cultivadas e, acima de tudo, desenvolvimento socioeconômico e sustentabilidade ambiental. Entretanto, torna-se necessária a realização de pesquisas sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, ao ambiente e, em especial, sobre culturas com expressão nacional e internacional, como a cana-de-açúcar, observando os reais benefícios ou prejuízos que podem ocorrer com a utilização/aplicação dos diferentes tipos de água residuárias passíveis de uso na agricultura.

##### **4.1 Cana-de-açúcar**

Segundo ProCana (2012), o setor sucroenergético movimenta cerca de R\$60 bilhões (considerando a produção de cana, açúcar, etanol e bioeletricidade), o que representa cerca de 2% do PIB (Produto Interno Bruto) nacional. Além disso, o setor sucroenergético empregou cerca de 1,28 milhões de pessoas com carteira assinada no ano de 2008, o que corresponde a 2,15% dos postos de trabalho no Brasil (NEVES et al., 2009), sendo, recentemente, registrados cerca de 4,5 milhões de empregos diretos e indiretos (PROCANA, 2012).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2013), a área nacional cultivada com cana-de-açúcar na safra 2012/2013 foi de 8.485 mil hectares, apresentando produção total de cana moída na ordem de 588,9 milhões de toneladas, com 69,41 t ha<sup>-1</sup> de rendimento médio de colmos e 136 kg t<sup>-1</sup> de ATR (açúcar total recuperável). O Estado de



São Paulo se destaca como o maior produtor nacional de cana, apresentando 52,07% da área cultivada e produtividade média de 74,83 t ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2013).

Segundo Scarpari e Beauclair (2010), a cana-de-açúcar pertence à classe das monocotiledôneas, família Poacea (gramíneae) e gênero *Saccharum*. Embora não se tenha real ideia da sua origem, acredita-se que essa cultura seja nativa do sudeste Asiático (FIGUEIREDO, 2010). Por ser uma planta do tipo C4, a cana-de-açúcar apresenta alta eficiência na conversão de energia radiante em química, apresentando maior potencial produtivo em regiões com grande disponibilidade de radiação e elevadas temperaturas, além de necessitar de maiores quantidades de água para suprir suas necessidades hídricas (SEGATO et al., 2006)

Conforme Ripoli et al. (2006), a cultura da cana-de-açúcar é uma planta ereta, de colmo cilíndrico, com pouca ou nenhuma presença de pelos, de coloração variável, rizomatosa, formando touceiras, considerada semi-perene e que perfilha. O perfilhamento ocorre na parte subterrânea e é evidenciado após a brotação das gemas (CASAGRANDE e VASCONCELOS, 2010).

#### **4.1.1 Sistema radicular**

O sistema radicular é uma das principais partes constituintes das plantas, visto que é responsável pela sustentação e, principalmente, absorção de água e nutrientes. Assim, para o pleno entendimento do comportamento da parte aérea da cana-de-açúcar devem-se considerar os processos que ocorrem no perfil do solo, principalmente no que diz respeito à distribuição e crescimento das raízes (VASCONCELOS e GARCIA, 2005). Entretanto, segundo Vasconcelos et al. (2003), a determinação do sistema radicular é trabalhosa (pois está inserido abaixo da superfície do solo) e, ainda, sofre influência da variabilidade das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo mascarar a quantificação das raízes.

Segundo Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2011), o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar é influenciada por diversas características, como: tolerância à seca, capacidade de germinação e, ou brotação, porte da planta, tolerância à movimentação de máquinas, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância ao ataque de pragas e parasitas do solo, dentre outros; sendo essas características determinantes na produção final da cultura. Vale ressaltar que não é a quantidade de raízes que condiciona a ocorrência das vantagens descritas, mas a sua distribuição uniforme no perfil do solo no decorrer dos ciclos de cultivo. Dessa forma, a análise do sistema

radicular da cana auxilia no embasamento para o emprego de técnicas de manejo da cultura, como a irrigação e fertilização.

Após o plantio, as raízes da cana-de-açúcar começam a crescer a partir da região meristemática do nó e se fixam ao solo, utilizando a energia contida no próprio colmo. Com o desenvolvimento da cana e aparecimento dos perfilhos, ocorre o aumento do volume radicular (BEAUCLAIR e SCARPARI, 2007), pois cada perfilho possui seu sistema radicular independente. Com o tempo, as primeiras raízes emitidas na região do nó vão desaparecendo e as raízes oriundas dos perfilhos e colmos vão crescendo no perfil do solo e, conseqüentemente, aumentando a absorção e sustentação da cana (VASCONCELOS e CASAGRANDE, 2010). Para Segato et al. (2006), o sistema radicular da cana-de-açúcar é altamente ramificado do tipo fasciculado o que facilita a absorção de água e nutrientes. Ainda segundo os mesmos autores, 60% das raízes se encontram a 0,2-0,3 m de profundidade e 85% até 0,5 m de profundidade.

Em revisão sobre a fisiologia do sistema radicular, Vasconcelos e Casagrande (2010) discutem sobre o desenvolvimento das raízes em soqueiras e ao longo dos cortes de soqueiras. Segundo os autores, a morte e, ou renovação das raízes não é ocasionada pelo corte, mas devido aos ciclos de secagem e umedecimento do solo. Nesse sentido, como a cana necessita de um período de maturação para acúmulo de sacarose no colmo (redução das atividades metabólicas da parte aérea), a incidência de chuvas nesse período provoca o crescimento radicular e, conseqüentemente, o consumo e o menor acúmulo de sacarose no colmo. Os autores mencionam, ainda, que os sucessivos ciclos da cultura proporcionam um incremento na exploração das raízes em profundidade, já a cana planta explora mais intensamente as camadas superficiais.

Ao avaliar três épocas de coleta de raiz da cultura da cana-de-açúcar (6, 12 e 18 meses de cultivo da cana planta; pelo método do monólito) cultivada sob terra-roxa-legítima (classificação atual: Latossolo Vermelho) na Usina Tamoio, Araraquara-SP, Inforzato e Alvarez (1957) observaram uma redução das raízes na última coleta, visto que o período dessa amostragem coincidiu com a época seca e fria do ano (final do mês de agosto). Os autores relatam que as principais diferenças ocorrem nas primeiras camadas de solo, pois aos 12 meses (período com condições favoráveis de umidade do solo) foram encontrados 41,8% do total de raízes na camada de 0-0,1 m e 18,7% entre 0,1-0,2 m de profundidade; enquanto aos 18 meses (período seco) foram encontrados 23,8 e 29,5% para as respectivas camadas. No final da pesquisa obtiveram

40,9; 71,0; e 66,0% das raízes acumuladas nos primeiros 0,3 m de profundidade para as épocas de coleta 6, 12 e 18 meses, respectivamente.

Estudando o sistema radicular da cana-de-açúcar na Venezuela (pela técnica do monólito), Avilán et al. (1978) encontraram 85% do sistema radicular a 0,3 m de profundidade. Os autores salientam que o sistema radicular sofreu interferência das propriedades físicas do solo, o que restringiu a penetração e o aprofundamento das raízes, visto que foi observada baixa macroporosidade (2,6%) na camada entre 0,25 e 0,5 m.

Alvarez et al. (2000) compararam o crescimento radicular de cana-de-açúcar crua (colhida mecanicamente) e cana-de-açúcar após queima (colhida manualmente) em dois anos consecutivos de rebrota. O experimento foi desenvolvido na Fazenda Barra do Agudo, município de Morro Agudo – SP, sob Latossolo Vermelho distrófico. Para tanto, foram coletadas amostras de “solo + raiz” com trado tradicional. Encontraram 75 e 70% de raízes nos primeiros 40 cm para cana crua no 1º e 2º ano, respectivamente; e 72 e 68% na mesma profundidade para cana queimada no 1º e 2º ano, respectivamente. Esses dados revelam um maior aprofundamento das raízes no tratamento após a queima e um acúmulo de raízes em superfície para cana crua, o que se deve à maior umidade na superfície do solo proporcionada pelo acúmulo de palhada. Além disso, nota-se que a cana-planta (1º ano de experimentação) apresentou sistema radicular mais desenvolvido que o 2º ano.

Em um ano atípico com altas precipitações, Farias et al. (2008) avaliaram a concentração de fitomassa de raízes no final do cultivo da cana-de-açúcar em tratamento irrigado (pivô central) e sequeiro no município de Capim-PB. Observaram maior acúmulo de raízes nas camadas superficiais nos dois tratamentos ao longo do experimento, ocorrendo diferenças entre os tratamentos aos 60 DAP. Ao ser irrigada, a cultura emitiu as raízes rapidamente (em virtude da maior umidade) e apresentou um maior volume de raízes nos primeiros 0,15 m de profundidade; entretanto, o tratamento sequeiro apresentou maior quantidade de raízes na camada de 0,16-0,3 m, o que pode ter ocorrido em função da pouca precipitação observada entre o 30º e 60º dia de cultivo. Os autores concluíram que ambos os tratamentos apresentam 75% das raízes concentradas nos primeiros 0,45 m de profundidade.

Santos (2010) conduziu experimento na Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), em Jaú-SP, com objetivo de determinar a distribuição do sistema radicular de duas cultivares de cana-de-açúcar (RB86-7515 e RB85-5536) sob irrigação por

gotejamento subsuperficial e em sequeiro. Para tanto, imagens do perfil do solo foram capturadas e, em seguida, analisadas no programa SAFIRA. O comprimento de raízes apresentou diferença na cana planta para cultivar RB86-7515, com tratamento sequeiro apresentando maior quantidade de raízes em profundidade; no segundo ano não houve diferença entre tratamento sequeiro e irrigado. Em geral, foi observada maior deficiência hídrica no primeiro ano de cultivo, o que pode ter possibilitado maior aprofundamento das raízes. Entretanto, não foram observadas diferenças no comprimento de raiz na cultivar RB86-5536 quando utilizados tratamentos irrigados ou sem irrigação. Apesar de apresentar menor quantidade de raízes em todas as camadas, a cultivar RB86-7515 mostrou uma distribuição mais homogênea ao longo do perfil. Além disso, o autor concluiu que o manejo irrigado proporcionou uma distribuição homogênea das raízes no perfil do solo, não havendo predominância de sua ocorrência na camada superficial, como no manejo sequeiro.

Objetivando avaliar o sistema radicular da cana-de-açúcar (cultivar SP90-3414) irrigado com efluente de esgoto tratado, Sousa et al. (2013) coletaram imagens do perfil do solo e analisaram com programa SIARCS 3.0. Quatro tratamentos foram avaliados: sem irrigação (TSI); irrigação atendendo 50% (T50%), 100% (T100%) e 200% (T200%) da necessidade hídrica da cultura. Os tratamentos com maiores lâminas (T100% e T200%) apresentaram menor área e comprimento de raízes nas camadas mais profundas. O TSI, T100% e T200% apresentaram 80% das raízes até 0,4 m de profundidade, já o T50% apresentou 80% do total de raízes até 0,6 m de profundidade. Segundo os autores, o maior aprofundamento do T50% é devido à menor expansão lateral das raízes. Essa uniformidade entre o tratamento sequeiro e os que receberam maior lâmina de irrigação (T100% e T200%) pode ter ocorrido em virtude das altas precipitações observadas no ano agrícola 2009/2010 (safra em que foi realizada a avaliação).

A quantidade de métodos para análise de raiz é numerosa. Nesse sentido, Vasconcelos et al. (2003) realizaram testes comparativos entre cinco diferentes métodos de avaliação do sistema radicular no município de Tarumã-SP, quais sejam: (1) monólito com medição de comprimento, (2) monólito com pesagem de massa seca (3) trado com pesagem de massa seca, (4) perfil com medição de comprimento por meio de imagens digitais e (5) perfil com contagem do número de raízes. Foram utilizadas duas variedades de cana-de-açúcar, dois sistemas de colheita (crua/mecanizada e queimada/manual) em quatro profundidades. Os autores constataram que existe relação linear simples entre os métodos estudados, exceto quando se utiliza o trado, pois

este superestimou a quantificação das raízes. Além disso, concluíram que os métodos de perfil foram os mais adequados para detectar diferenças entre tratamentos, já que apresentaram menores coeficientes de variação.

Nesse contexto, Vasconcelos et al. (2003) recomendam algumas características a serem consideradas na escolha do método utilizado na avaliação do sistema radicular: sua precisão, quais parâmetros que serão quantificados, os objetivos da pesquisa, cultura em questão e as condições em que ela se desenvolve. Além destes, deve-se procurar utilizar métodos rápidos, menos trabalhosos (quando comparado aos métodos de perfuração convencional do solo) não destrutíveis e que permitam observações periódicas, ou seja, análise da longevidade das raízes. Tais características podem ser obtidas ao utilizar o método *minirhizotron*, já que após sua instalação as leituras são realizadas sem novos impactos ao estande de plantas e no mesmo local (BRAGG et al., 1983; CHENG et al., 1991; RYTTER e HANSSON, 1996; DILUSTRO et al., 2002), além de permitir a observação dos ciclos de nascimento e morte (WALLANDER et al., 2013), características fundamentais quando se deseja avaliar experimentos por vários anos.

A técnica do *minirhizotron* baseia-se na coleta de imagens do sistema radicular *in loco* com auxílio de tubos transparentes instalados no perfil do solo, permitindo que as raízes possam crescer e se distribuir em interface solo-tubo (BRASIL et al., 2007). Segundo Santos Júnior et al. (2007), o uso desse método permite mensurar a produção, alongamento e mortalidade do sistema radicular de forma independente. Johnson et al. (2001) realizaram uma revisão sobre *minirhizotrons*, na qual relatam sobre instalação, angulação e proteção dos tubos transparentes, frequência de coleta dos dados, qualidade dos dados coletados, dentre outras informações relevantes.

Himmelbauer et al. (2004) salientam que a avaliação radicular é um processo complexo e caro, mas que a análise via imagem digital fornece uma oportunidade para facilitar o processo de análise. Segundo os mesmos, a avaliação do comprimento e área radicular fornece informações relevantes sobre a absorção de água e nutrientes.

O sistema *minirhizotron* é formado por um tubo de observação transparente instalado no solo, uma câmera de vídeo com ajustes de foco e nível de luz, um sistema de gravação (videocassete), um monitor para acompanhar e visualizar a coleta das imagens e outros acessórios (CHENG et al., 1991). Na Figura 1 é apresentada uma foto ilustrativa dos equipamentos que compõem o sistema *minirhizotron* (PATEÑA e INGRAM, 2000).



cm, possui interface USB que possibilita interação com computador portátil em campo (CID BIO-SCIENCE, 2010), além de serem adequados para monitorar o crescimento detalhado de raízes individuais (DANNOURA et al., 2008).

Embora apresente várias vantagens, o uso de *minirhizotrons* apresenta algumas deficiências, como tempo para processamento de imagem (principalmente ao intensificar o número de amostragens, profundidades avaliadas e tubos utilizados), incerteza quanto à morte das raízes (a imagem pode ter ficado obscura ou quando houve movimentação do tubo) (WALLANDER et al., 2013), além da possibilidade de ocorrerem modificações no ambiente natural de crescimento radicular próximo ao contato solo-tubo, resultando em anormalidades (CHENG et al., 1991), e do alto custo de aquisição (leitores, tubos transparentes e *softwares* de manipulação de imagens).

Estudos relacionados à qualidade e quantidade do sistema radicular são imprescindíveis para avaliar o manejo empregado e, ou para determinar a resposta de estudos científicos. Embora os métodos de observação radicular via imagem possuam limitações, eles apresentam muitas vantagens na compreensão do desenvolvimento das raízes. Nesse sentido, o emprego de *minirhizotrons* apresenta-se como ferramenta eficiente no estudo radicular, visto sua praticidade, rapidez e, principalmente, pelo baixo efeito destrutivo ao solo.

#### **4.1.2 Irrigação e adubação**

O principal objetivo da irrigação é suprir a demanda hídrica das plantas para que se possa garantir o estabelecimento e uma boa produtividade das culturas. É uma técnica necessária em determinadas épocas do ano ou em determinadas localidades, principalmente quando o cultivo é influenciado por alguns fatores de ordem climática e geográfica que se apresentam determinantes para a escassez de água e restrição da atividade agrícola, como, por exemplo, a distribuição irregular da precipitação, ocorrência de sazonalidade das épocas do ano (períodos secos e chuvosos), posicionamento geográfico das fontes hídricas (contraste entre regiões hidrográficas, por exemplo) ou pelas condições edafoclimáticas da Região (Áridas e Semi-Áridas, por exemplo).

Desta forma, segundo Dantas Neto et al. (2006), a irrigação se torna uma prática essencial para manutenção e aumento da produtividade dos cultivos, principalmente de espécies com grande importância econômica como a cana-de-açúcar. Dentre as vantagens de se praticar a

irrigação nesta cultura, destaca-se o melhor desenvolvimento inicial, aumento de produtividade (MARQUES et al., 2006; SANTOS e FRIZZONE, 2006), longevidade das soqueiras (FRIZZONE et al., 2001), redução da oscilação anual da produção, aumento do perfilhamento, dentre outros.

Tais benefícios fazem da irrigação uma atividade necessária para aumento vertical da produção canavieira, o que reduz, conseqüentemente, a ampliação de áreas plantadas ou a substituição de outras culturas agrícolas pelo plantio de cana-de-açúcar. De forma idêntica, a fertilização do solo proporciona aumento e, ou mantém a produção e, também, prolonga o tempo de vida útil do canavial (STAUT, 2006). Porém, salienta-se que o emprego da irrigação e fertilização deve ser eficiente e racional, já que tanto a escassez quanto o excesso de água (SILVA et al., 2009) ou da adubação prejudicam o desenvolvimento da cultura.

Com objetivo de verificar o efeito da frequência da irrigação por gotejamento subsuperficial (IGSs) no desenvolvimento da cana planta em Botucatu-SP, Dalri e Cruz (2002) estabeleceram três frequências de irrigação, onde a irrigação era acionada quando a evapotranspiração da cultura (ETc) atingia 10, 20 e 30 mm. Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos irrigados, mas foi observado diferença entre os tratamentos irrigados com a testemunha (sem irrigação), evidenciando que a irrigação favorece o aumento da produção na cana-de-açúcar. Além disso, os autores observaram que a fertilidade e a capacidade de armazenamento de água do solo proporcionaram uma produtividade razoável no tratamento sequeiro. Nos ciclos seguintes (1ª e 2ª soca), Dalri e Cruz (2008) fixaram a lâmina de água aplicada em 20 mm e variaram os teores de nitrogênio (N) e potássio (K), onde NK50, NK100 e NK150 correspondem a 50%, 100% e 150% da necessidade de N e K para a cana-de-açúcar, respectivamente. Observaram que os tratamentos irrigados e com as maiores doses de fertilizantes apresentaram as maiores produtividades, além de não terem sido observadas alterações nos atributos tecnológicos do caldo cana após sucessivas irrigações.

Ao avaliar os parâmetros de crescimento, qualidade e rendimento da 1ª soca de cana-de-açúcar quanto a diferentes lâminas de irrigação (em pivô rebocável) e dois níveis de adubação de cobertura no Município de Capim, Paraíba, Dantas Neto et al. (2006) observaram que a dose de adubação influenciou mais que a lâmina de irrigação (para os parâmetros analisados) e concluíram que os fatores (lâmina de irrigação e doses de adubação) atuaram de forma independente sobre as variáveis analisadas. Na mesma localidade, Silva et al. (2009) estudaram o



crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar (via pivô central rebocável) sob quatro diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. Ao final, os autores concluíram que a cana-de-açúcar irrigada apresentou o melhor desempenho em todas as variáveis avaliadas quando comparado ao tratamento sem irrigação, exceto para comprimento de colmo que foi influenciado pela interação “irrigação x adubação”.

Quintana et al. (2012) avaliaram os parâmetros tecnológicos e a produtividade da cana planta (variedade RB85-5453) submetida a IGSs com ou sem adição de boro no plantio, em Barretos-SP. O experimento foi implantado em esquema fatorial 3x2, sendo três formas de condução da cultura: sequeiro, irrigado e fertirrigado (com nitrogênio e potássio); e dois níveis de boro no plantio: sem e com boro. Quando comparado ao tratamento sem irrigação, foi observado incremento de 14,9% no ATR e 30,8% na produtividade com uso da IGSs, e 16,8% no ATR e 42,3% na produtividade com o uso da fertirrigação. Por último, concluíram que a aplicação de boro não alterou as variáveis tecnológicas avaliadas e que o uso da irrigação na cultura da cana-de-açúcar aumenta a produtividade e a quantidade de açúcar recuperável, além de reduzir o teor de açúcares redutores do caldo.

Em experimento realizado em Jaú-SP, Gava et al. (2011) avaliaram três variedades de cana-de-açúcar (RB86-7515; RB85-5536 e SP80-3280) e dois manejos da cultura (sistema de irrigação por gotejamento subterrâneo e sistema de sequeiro) quanto à produtividade e alguns parâmetros tecnológicos (sacarose – Pol, e Fibra da cana-de-açúcar). A produtividade média das 3 variedades aumentou em 20% na cana planta e 28% na 1ª soca e proporcionou um incremento médio de 24% na produção de colmos e 23% na produção de açúcar. A variedade SP80-3280 apresentou o melhor rendimento quando submetida à irrigação, seguida da RB86-7515 e RB85-5536, respectivamente; a SP80-3280 também apresentou a maior eficiência de uso da água, indicando que é possivelmente a mais sensível ao estresse hídrico. Por fim, os autores concluíram que as variedades estudadas apresentam diferentes respostas à disponibilidade hídrica.

Barbosa et al. (2012) estudaram o efeito da irrigação, aplicação de vinhaça e fertirrigação mineral via IGSs sobre a produção de colmos e qualidade do caldo da cana-planta, em Guaira-SP. Para tanto, avaliaram tratamentos sem irrigação e tratamentos irrigados suprimindo as necessidades da planta de forma total ou complementar. Independente do manejo da fertirrigação, o uso da irrigação proporcionou aumento no número de perfilhos e no índice de área foliar quando comparado ao cultivo sem irrigação. Além disso, quando comparado ao tratamento sem irrigação,

a complementação de K pela vinhaça proporcionou maior produção de colmos e, ainda, a irrigação e a fertirrigação com a vinhaça atendendo toda necessidade de NK proporcionou maior rendimento teórico de açúcar recuperável (ATR). Nos três cortes seguintes (1ª, 2ª e 3ª soca), Barbosa et al. (2013) substituíram o tratamento que supria toda demanda de NK pelo tratamento que atendia nitrogênio, fósforo e potássio – NPK. Os resultados demonstraram que o uso da irrigação, fertirrigação e aplicação de vinhaça não alterou a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar; a irrigação associada à fertirrigação mineral ou irrigação associada à fertirrigação mineral e vinhaça aumentou o número de perfilhos nas 2ª e 3ª socas; quando a vinhaça foi utilizada, a produção de colmos aumentou na 3ª soca.

Em geral, a utilização da irrigação ou a sua associação com a fertilização proporciona aumento na produção da cana-de-açúcar e melhoria da qualidade tecnológica do seu caldo. Entretanto, a falta ou excesso de água e nutrientes compromete o desenvolvimento das plantas e, consequentemente, a saúde financeira do agricultor. Assim, considerando os problemas relacionados à escassez dos recursos hídricos e as deficiências nutricionais, responsáveis por restringir o desenvolvimento normal das plantas, estudos relacionados a práticas eficientes de manejo de irrigação e avaliação *in loco* da fertilidade do solo são indispensáveis para evolução dos cenários produtivos, principalmente quando se deseja aumentar verticalmente a produção.

#### **4.2 Emprego de água residuária de esgoto doméstico na agricultura**

A utilização de fontes alternativas no fornecimento de água para irrigação se torna uma escolha economicamente viável e ambientalmente sustentável, já que é grande o consumo de água pelo setor agrícola (ANA, 2012). Nesse sentido, a reutilização de água proveniente de estações de tratamento de esgoto (EET – efluente de esgoto tratado) apresenta-se como opção para reverter o quadro de escassez e, ainda, proporcionar benefícios sociais e ambientais, pois constitui num método que minimiza a poluição nos mananciais e possibilita a liberação de recursos hídricos de melhor qualidade para atividades mais nobres e exigentes em qualidade, como o abastecimento público (devido à substituição da água potável por água que já foi previamente usada), visando o emprego racional e eficiente de água na agricultura (ANDRADE et al., 2005; CERQUEIRA et al., 2008; DANTAS e SALES, 2009; SANDRI et al., 2009; ANA, 2012) e, também, possibilitando a geração de empregos ao longo de toda cadeia produtiva.

Salienta-se que a partir do desenvolvimento industrial e crescimento populacional houve aumento expressivo na geração de resíduos sólidos e águas residuárias (TASSO JÚNIOR et al., 2007), principalmente advindas de esgoto doméstico – representando uma fonte de contaminação tanto do solo quanto da água.

Segundo Pescod (1992), a irrigação é uma forma eficaz de utilização de EET; no entanto, esse resíduo necessita de tratamento prévio para que seja fornecido às plantas. Em sua revisão, o autor apresenta diferentes métodos convencionais que podem ser utilizados no tratamento de água residuária, ressaltando que o tratamento mais apropriado é aquele que proporciona um efluente com níveis microbiológicos e químicos adequados com menor custo de operação/manutenção do sistema.

O emprego de tratamentos convencionais se caracteriza por uma combinação de processos biológicos, químicos e operações físicas para remoção de sólidos, matéria orgânica e, às vezes, nutrientes químicos em excesso; resultando em água com sólidos inorgânicos e matéria orgânica em suspensão ou dissolvidos (PESCOD, 1992).

Em contrapartida, se o esgoto não passar por nenhum tipo de tratamento é observada a ocorrência da decomposição do material orgânico presente (culminando na produção de gases de odor desagradável), além da possibilidade de haver eutrofização de mananciais (decorrente da presença de nutrientes presentes no esgoto). Cumpre ressaltar que o lançamento de esgoto em cursos d'água necessita de tratamento prévio (conforme resolução CONAMA nº430 de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes). Caso essa resolução não seja acatada e, conseqüentemente, o resíduo bruto seja lançado diretamente nos cursos d'água, haverá danos ao desenvolvimento e sobrevivência da flora e fauna aquática, já que as concentrações de oxigênio dissolvido em água serão reduzidas. Isso ocorre, sobretudo, pelos altos teores de nitrogênio e fósforo presentes no esgoto, valores que podem ultrapassar o limite permitido pela resolução CONAMA nº357 de 2005.

Por meio da resolução CONAMA nº357, de 2005, as águas são divididas em três categorias: doce, salina e salobra; sendo que cada uma apresenta sua subdivisão: água doce apresenta cinco subclasses (classe especial, classe 1, 2, 3 e 4); água salina apresenta quatro subclasses (classe especial, classe 1, 2 e 3) e água salobras apresenta quatro subclasses (classe especial, classe 1, 2 e 3). Segundo esta mesma resolução, cada classe de água apresenta limites em sua qualidade (sejam parâmetros físicos, biológicos ou químicos), o que permite qualificar a

água de irrigação em três classes da água doce (classe 1, 2 e 3). Em seguida, são apresentadas tais classes com uma breve descrição:

- Classe 1: águas que podem ser destinadas à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película;
- Classe 2: águas que podem ser destinadas à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- Classe 3: águas que podem ser destinadas à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras.

Apesar da resolução CONAMA nº357, de 2005, dispor sobre a classificação dos corpos de água e tratar sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, não é considerada a opção de aplicação de efluentes em solos agrícolas. Posteriormente, foi estabelecida uma resolução complementar CONAMA nº430, de 2011, que considera o uso de efluente aplicado ao solo, mas apenas regulamenta, em seu artigo 2º, a proibição da poluição ou contaminação de águas superficiais e subterrâneas a partir da utilização de efluentes no solo. Já a resolução CNRH nº121, de 2010, institui diretrizes e critérios para reúso de água não potável na produção agrícola e florestas plantadas. Esta última resolução estabelece que as características físicas, químicas e biológicas da água de reúso, a caracterização e o monitoramento periódico, as concentrações recomendadas de elementos químicos e demais substâncias no solo devem atender a legislação pertinente e, ainda, frisa que a aplicação desse resíduo não deve causar danos ambientais e à saúde pública.

Van Ginneken e Oron (2000) afirmam que praticamente nenhum país apresenta uma definição quanto aos critérios de risco aceitáveis para uso de águas residuárias. Nesse contexto, observa-se que as leis brasileiras ainda apresentam deficiências quanto às orientações de uso das águas residuárias aplicadas à agricultura, pois não especificam os critérios e limites que deveriam ser atribuídos.

Assim, devido a essa deficiência, os estados brasileiros vêm se organizando para estabelecer normas para uso e aplicação desse resíduo. No Estado de São Paulo, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) publicou orientações para aplicação de água de

reúso proveniente de estação de tratamento de esgoto doméstico na agricultura (CETESB, 2014). Baseado em normas estabelecidas pela OMS (Organização Mundial de Saúde), FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) e Decreto Estadual 8.468 de 1976 (SÃO PAULO, 1976), a CETESB definiu critérios mínimos e exigências técnicas a serem atendidas com vista à proteção do meio ambiente e à saúde pública, para tanto são consideradas algumas informações: qualidade do efluente (química, física e biológica); área de aplicação; quanto ao uso pretendido (espécie vegetal não consumida crua); tipo de sistema utilizado na aplicação (métodos de irrigação); quantidade a ser aplicada; dentre outras.

Cabe ressaltar que o EET é rico em nutrientes, principalmente N, P, K (FONSECA, 2001; BERTONCINI, 2008), o que possibilita a economia com fertilizantes inorgânicos e matéria orgânica e, ainda, proporciona o aumento da produtividade agrícola (BERNARDI, 2003), além de permitir a fertilização contínua e parcelada, já que os nutrientes estão dissolvidos em água. Sabe-se que a aplicação de fertilizantes através da água de irrigação proporciona aumento da eficiência da adubação e do uso de nutrientes pela cultura, devido à possibilidade do parcelamento da aplicação conforme as suas necessidades (PIRES et al., 2010). Além disso, o uso de efluentes de esgoto também se torna uma opção atrativa do ponto de vista econômico, já que permite a reciclagem tanto do carbono quanto de alguns nutrientes (MELO et al., 2008).

Outro aspecto interessante ocorre na interação “solo x efluente x planta”, já que o solo funciona como um “filtro biológico” que realiza o polimento do efluente, o que permite a disponibilidade contínua de água e nutrientes em áreas irrigadas. Tal processo também é conhecido como “tratamento de efluentes de esgoto por disposição controlada no solo” (ANDRADE et al., 2005). Vale ressaltar a necessidade de avaliar os processos envolvidos na aplicação de efluente (como lâmina hídrica de esgoto aplicado, período e frequência de aplicação, entre outros), bem como os impactos que essa prática pode ocasionar ao solo e ao meio ambiente (GLOAGUEN et al., 2007; FONSECA et al., 2007; VERONEZ, 2009; VARALLO et al., 2010).

Apesar dos diversos efeitos positivos, Andrade e colaboradores (2005) alertam para quantidade de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) presente nos EET, visto que esse elemento pode apresentar efeitos adversos à saúde humana (ALABURDA e NISHIHARA, 1998) e provocar a contaminação de águas profundas em função de sua alta solubilidade em água. Além disso, deve-se tomar maior cuidado em solos arenosos, pois a percolação é mais rápida quando comparado a solos argilosos, o que permite um maior acúmulo de nitrato em profundidade (ANDRADE et al., 2005).

Capra e Scicolone (2007) afirmam que água residuária oriunda de cidades apresenta grande variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas potencialmente tóxicas. Os autores alertam que o principal risco associado à irrigação com esse material é referente à contaminação com organismos micro e macro patogênicos, os quais podem provocar doenças em seres humanos, animais e plantas, devendo, portanto, ser utilizado com critério (AZEVEDO e OLIVEIRA, 2005).

Diversos pesquisadores vêm estudando e relatando os efeitos da sodicidade e salinidade sobre variações das propriedades físico-hídricas do solo e as implicações sobre a porosidade, permeabilidade, capacidade de infiltração, retenção de água e demais atributos físicos do solo (BALKS et al., 1998; BOND, 1998; ABEDI-KOUPAI et al., 2006; GONÇALVES et al., 2010; SOUZA et al., 2010; MORUGÁN-CORONADO et al., 2011; TZANAKAKIS et al., 2011; MOJID e WYSEURE, 2013). Além disso, Varallo et al. (2010) ressaltam que o excesso de sal na água proporciona a redução na absorção de água pela planta e a degradação das propriedades físicas do solo.

Segundo Bond (1998), as principais limitações da aplicação sustentável de efluentes no solo são: lixiviação de nitrato para águas profundas, salinidade e sodicidade do solo. O autor cita que em solos arenosos a lixiviação de fósforo também pode ser outro fator limitante ao emprego da irrigação com esse tipo de água.

De acordo com exposto, a aplicação de EET na agricultura irrigada apresenta-se como alternativa viável para substituição de doce, podendo minimizar a problemática da escassez atual e futura de água, a degradação ambiental e, conseqüentemente, melhorar a qualidade de vida, ampliar a disponibilidade de recursos hídricos e, sobretudo, fornecer informações relevantes para criação de leis específicas que regulamentem o uso de efluentes no território nacional. Entretanto, como a interação desse resíduo com o ambiente solo-planta carece de conhecimento, informações técnico-científicas de médio e longo prazo são necessárias para o emprego racional deste resíduo.

#### **4.2.1 Uso da irrigação localizada na aplicação de efluente de esgoto doméstico**

Cada sistema de irrigação apresenta características específicas que permitem sua adequação na aplicação de efluente de esgoto tratado (EET), possibilitando ou não a redução dos riscos associados ao uso desse tipo de água. Pereira et al. (2002) propõem quatro parâmetros para classificar alguns métodos de irrigação utilizados na aplicação de efluentes (Tabela 1),

evidenciando que os métodos de irrigação por superfície, aspersão ou localizada do tipo micro aspersão e micro spray apresentam riscos de contaminação aos alimentos e à saúde, além de poderem provocar toxidez às plantas. Por outro lado, a irrigação localizada do tipo gotejamento parece ser a mais apropriada para aplicação de águas residuárias.

Segundo Puig-Bargués et al. (2010), a irrigação por gotejamento é o melhor método de irrigação para aplicação de EET. Segundo os autores, o gotejamento divide-se em dois tipos: gotejamento superficial – IGS (tubos gotejadores dispostos sobre a superfície do solo), e gotejamento subsuperficial – IGSs (tubos gotejadores enterrados abaixo da superfície do solo). Dentre estes, a IGSs apresenta elevado potencial de uso, principalmente no emprego de EET, já que a aplicação de água é realizada diretamente na zona radicular, resultando em maior eficiência de uso da água e com baixo risco de contaminação do operador e da cultura irrigada, minimizando os riscos à saúde humana (RESENDE et al., 2004, CARARO e BOTREL, 2007; LAMM e CAMP, 2007).

Além disso, o IGSs apresenta diversas vantagens em relação aos demais sistemas de irrigação, dentre elas, redução de perdas por evaporação da água diretamente do solo, redução de danos mecânicos ao sistema, facilita o tráfego de máquina e os tratos culturais, não molha as folhas ou frutos (ANDRADE e BRITO, 2006), reduz a formação de aerossóis que possam depositar micro-organismos patogênicos sobre as plantas (CAPRA e SCICOLONE, 2007; PLETSCHE, 2008), minimiza a percolação profunda – principalmente de nitrato (CAPRA e SCICOLONE, 2007), e o odor exalado pelo EET (TROOIJEN e HILLS, 2007) e, ainda, apresenta melhor eficiência na aplicação dos fertilizantes dissolvidos na própria água de irrigação – fertirrigação, garantindo melhor desenvolvimento (DALRI e CRUZ, 2002; FARIAS et al., 2008) e maior produção (DALRI e CRUZ, 2008).

Por meio da normativa NBR 13969 de 1997, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1997) estabeleceu quatro classes para tratamento e disposição final de efluentes líquidos, com origem de esgoto doméstico ou similar, para fins não potáveis. A normativa define o grau de tratamento segundo a necessidade de uso do efluente, podendo-se minimizar o tratamento para usos menos restritivos. Por exemplo, a classe 4 (menos restritiva), estabelece o reúso em cultivos agrícolas sob irrigação de superfície ou por gotejamento (fonte pontual), com alguns limites: Coliforme fecal inferior a  $5.000 \text{ NMP } 100 \text{ mL}^{-1}$ , oxigênio dissolvido acima de  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  e, ainda, cessando a irrigação pelo menos 10 dias antes da colheita. Ressalta-se que a normativa

Tabela 1. Fatores para escolha do método de irrigação no uso de águas residuárias.

| <b>Método de irrigação</b>                              | <b>Risco à saúde humana</b>                                                                                                      | <b>Contato com frutas e partes comestíveis</b>                                                                         | <b>Salinização da zona radicular</b>                                                                  | <b>Contato foliar</b>                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superfície por inundação                                | Provável ocorrência quando o controle da água é manual, exceto quando sistema é automatizado; devem-se tomar medidas preventivas | Não ocorre em árvores, videiras ou na maioria das hortícolas de maior porte; pode ocorrer em hortícolas de baixo porte | Improvável que ocorra, exceto quando a irrigação apresenta uniformidade de aplicação muito deficiente | Possível que ocorra na parte inferior de culturas com baixo porte, em forrageiras e durante a fase de crescimento das plantas |
| Superfície por sulco                                    | Provável ocorrência quando o controle da água é manual, exceto quando sistema é automatizado                                     | Rara ocorrência, pois o cultivo é sobre canteiros                                                                      | Há tendência de acúmulo sobre o canteiro; lixiviação se faz necessária antes do plantio               | Difícilmente ocorre, já que o cultivo é sobre canteiros                                                                       |
| Aspersão                                                | Geralmente não há contato quando a irrigação está em funcionando; pode haver contato com equipamentos molhados                   | Há contaminação                                                                                                        | Improvável que ocorra, exceto quando a irrigação apresenta uniformidade de aplicação baixa            | Ocorrem graves danos nas folhas, afetando a produtividade da cultura                                                          |
| Localizada por gotejamento superficial e subsuperficial | Improvável que ocorra, exceto quando há contato com equipamentos molhados                                                        | Improvável que ocorra                                                                                                  | Improvável que ocorra, exceto quando a irrigação apresenta uniformidade de aplicação baixa            | Improvável que ocorra                                                                                                         |
| Localizada por micro aspersão e micro spray             | Geralmente não há contato quando a irrigação está funcionando; pode haver contato com equipamentos molhados                      | Frutas e hortaliças podem ser contaminadas; há baixa ocorrência de contaminação em árvores quando não venta            | Improvável que ocorra, exceto quando a irrigação apresenta uniformidade de aplicação baixa            | Ocorrem graves danos nas folhas, afetando a produtividade de culturas anuais; não se observa o mesmo em árvores               |

Fonte: adaptado de Pereira et al. (2002).



NBR 13969 passou por análise sistemática e teve seu conteúdo técnico confirmado por um comitê de estudos no ano de 2008 (DANTAS e SALES, 2009). Apesar da ABNT considerar que a irrigação por superfície ou por gotejamento são os métodos indicados para aplicação de efluente, sabe-se que a IGSs é o método que fornece as melhores características para aplicação de águas residuárias, conforme descrito anteriormente.

Com objetivo de avaliar os níveis de contaminação do solo, das folhas e grãos de milho doce (*Zea mays* L., *saccharatum*), Oron et al. (1991) aplicaram efluente doméstico com auxílio de três diferentes métodos de irrigação: (1) IGSs e (2) IGS e (3) aspersão. Os autores observaram que a umidade dificulta a morte dos micro-organismos, logo o sistema de irrigação por aspersão apresentou os maiores índices de contaminação, o que limita seu uso para aplicação de efluente. Por outro lado, o IGSs apresenta pouco ou nenhum umedecimento da superfície do solo, o que proporciona menor concentração de coliformes fecais e, conseqüentemente, redução na contaminação das plantas.

Conforme exposto, a irrigação por gotejamento é a que apresenta o menor risco de contaminação da saúde e do ambiente quando EET são aplicados. Entretanto, os elevados níveis de sólidos suspensos, material orgânico e inorgânico e organismos vivos presentes no EET podem comprometer o correto funcionamento da irrigação, devido à suscetibilidade dos gotejadores ao entupimento e, conseqüentemente, redução da vazão e baixa uniformidade de distribuição de água. Segundo Capra e Scicolone (2007), o risco ao entupimento dos gotejadores depende do nível de tratamento em que a água residuária foi submetida, citando que o tratamento terciário e a cloração como forma de minimizar o entupimento provocado por algas e bactérias.

Assim, um manejo que deve ser considerado e empregado na irrigação por gotejamento é a filtragem da água de irrigação, que pode garantir o adequado funcionamento e longevidade do sistema (LAMM e CAMP, 2007). Entretanto, como os filtros convencionais não removem partículas de argila e silte, algas e bactérias (devido ao seu pequeno tamanho), pode haver floculação no interior do tubo gotejador, provocando, conseqüentemente, o entupimento (NAKAYAMA et al., 2007; PUIG-BARGUÉS et al., 2010). Dessa forma, a lavagem periódica das linhas laterais é de extrema importância para eliminação dessas partículas (RAVINA et al., 1992; NAKAYAMA et al., 2007). Porém, salienta-se que essa operação deve ser realizada com critérios, visto que ao utilizar águas de baixa qualidade pode-se provocar o contato com o operador e cultura irrigada, conseqüentemente, uma possível contaminação.

Não existem técnicas suficientes para prever com precisão quando os problemas de entupimento vão ocorrer. Entretanto, pesquisas desenvolvidas permitem estabelecer critérios de entupimento de gotejadores para diferentes qualidades de água (AYERS e WESTCOT, 1994). Assim, para que se possa determinar a natureza do processo de entupimento, análises físicas, químicas e biológicas da água de irrigação devem ser realizadas (NAKAYAMA e BUKS, 1991). Nesse sentido, Nakayama e Buks (1991) agruparam informações disponíveis sobre os fatores que contribuem para o entupimento do gotejador (Tabela 2).

Tabela 2. Classificação da água de irrigação em relação ao potencial de risco de entupimento do gotejador.

| Fatores de entupimento                                           | Níveis de risco |                 |          |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------|
|                                                                  | Baixo           | Moderado        | Severo   |
| <b>Físico (<math>\text{mg dm}^{-3}</math>)</b>                   |                 |                 |          |
| Sólidos em suspensão                                             | < 50            | 50 – 100        | > 100    |
| <b>Químico (<math>\text{mg dm}^{-3}</math>)</b>                  |                 |                 |          |
| pH                                                               | < 7,0           | 7,0 – 8,0       | > 8,0    |
| Sólidos dissolvidos                                              | < 500           | 500 – 2.000     | > 2.000  |
| Ferro total                                                      | < 0,2           | 0,2 – 1,5       | > 1,5    |
| Manganês                                                         | < 0,1           | 0,1 – 1,5       | > 1,5    |
| Sulfeto de hidrogênio                                            | < 0,2           | 0,2 – 2,0       | > 2,0    |
| <b>Biológico (<math>\text{NMP mL}^{-1}</math>)<sup>(1)</sup></b> |                 |                 |          |
| População bacteriana                                             | < 10.000        | 10.000 – 50.000 | > 50.000 |

<sup>(1)</sup> Número mais provável, NMP. (Fonte: adaptado de NAKAYAMA e BUKS, 1991).

Outra tomada de decisão importante quanto ao uso da IGSs diz respeito à profundidade de instalação do tubo gotejador. Segundo Lamm e Camp (2007), a profundidade de instalação desejável para os tubos gotejadores varia com a cultura, tipo de solo, fonte de água, pragas, clima, práticas culturais previstas e preferência do irrigador, sendo que as características de enraizamento da cultura e propriedades de redistribuição de água do solo devem ser os fatores mais importantes na escolha da profundidade. Ainda segundo os mesmos autores, na aplicação de efluentes biológicos, a profundidade dos gotejadores deve ser aquela que reduz a exposição de patógenos na superfície do solo, mas utilizando uma profundidade que permita uma deterioração biológica normal.

Em ampla revisão sobre IGSs, Camp (1998) encontrou tubos gotejadores instalados entre 0,02 e 0,7 m de profundidade e apresentou dois trabalhos com cana-de-açúcar, onde foram utilizadas as profundidades 0,1 e 0,3 m. Em geral, gotejadores instalados em maiores profundidades garantem uma menor evaporação da água na superfície do solo e um aumento na

eficiência de uso da água, além de permitir uma ampla gama de práticas culturais; em contrapartida, limitam a germinação de sementes (DEVASIRVATHAM, 2009) e o desenvolvimento de culturas com sistema radicular raso, como as hortícolas (LAMM et al., 2010). Assim, pode haver maior necessidade de aplicação de água e, conseqüentemente, provocar lixiviação excessiva, degradação ambiental e aumento dos custos da irrigação (CAMP, 1998) e, ainda, reduzir a eficiência do uso da água. Por outro lado, quando comparado ao gotejamento superficial, a instalação de IGSs em profundidades rasas possibilita uma proteção ao tubo gotejador contra o ataque de insetos e animais, reduz a temperatura da água e os efeitos sobre o entupimento químico e biológico (LAMM e CAMP, 2007).

Ao comparar diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador (0; 0,15; 0,3; 0,45; 0,6; e 0,75 m) com aplicação de duas águas salinas sob cultivo de pera em solo arenoso, Oron et al. (1999) observaram diferentes padrões de umedecimento, sendo que a umidade média não apresentou alteração entre a instalação de 0 a 0,45 m de profundidade; no entanto, quando instalado a 0,6 e 0,75 m a umidade média no perfil do solo foi menor em função de perdas por percolação profunda. Além disso, foi obtida maior produtividade quando os gotejadores foram inseridos a 0,3 m de profundidade para ambas as qualidades de água, o que se deve à compensação do potencial osmótico do solo promovida pela distribuição uniforme de água na zona radicular.

Estudando diferentes espaçamentos entre gotejadores (0,75; 1,0; e 1,5 m) e duas profundidades de instalação do tubo gotejador (0,3 e 0,45 m) em solo arenoso na cultura da alfafa, Alam et al. (2002) não observaram diferença entre as profundidades avaliadas, visto que a produção foi similar.

Um estudo, com duração de três anos, realizado sob solo franco-argiloso da Califórnia demonstrou que tubos gotejadores instalados 0,3 ou 0,45 m de profundidade apresentaram maior produção de matéria seca de feijão guandu quando comparado à instalação a 0,6 m de profundidade (BRYLA et al. 2003). Segundo os autores, o gotejamento localizado a 0,6 m era profundo para disponibilizar umidade adequada no início do desenvolvimento das plantas.

Lamm e Trooien (2005) não observaram influência de diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador (0,20; 0,30; 0,41; e 0,51 m) em solo franco siltoso do oeste do Kansas na produção da cultura do milho (proporcionado pela boa capacidade de retenção de água no solo, o que permitiu um aprofundamento das raízes), com ligeira redução da produção na

maior profundidade avaliada (0,61 m), o que pode ter sido provocado pela baixa disponibilidade de água e nutrientes na fase de germinação das sementes. Além disso, foi observado molhamento da superfície do solo para as menores profundidades de instalação (0,20 e 0,30 m).

Patel e Rajput (2007) avaliaram quatro profundidades de instalação do tubo gotejador (0; 0,05; 0,1; 0,15; e 0,2 m) na cultura da batata, onde, também, observaram molhamento da superfície do solo para tubos instalados a 0,05 m de profundidade. As demais profundidades não apresentaram umedecimento da superfície do solo devido à predominância da força da gravidade em relação às forças capilares do solo arenoso. Concluíram que a melhor profundidade de instalação do gotejador é a 0,1 m; e ressaltaram que a profundidade de instalação deve ser diferente para diferentes culturas e tipos de solo.

Ao avaliar o sistema radicular do algodão, em solo arenoso do Texas, submetido a diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador (0; 0,15; 0,30; e 0,45 m), Kamara et al. (1991) não observaram diferença no desenvolvimento e distribuição das raízes, já que as raízes se distribuíram no solo e não se concentraram na região do bulbo úmido. Segundo os autores, o perfil do solo tende a umedecer em regiões sujeitas a precipitações, evitando que a aplicação de água seja o principal fator atuante sobre o desenvolvimento das raízes.

Machado e Oliveira (2007) compararam o efeito da profundidade de instalação do tubo gotejador a 0,2 e 0,4 m com a IGS quanto à uniformidade de irrigação e a eficiência do uso da água em cultivo de tomate industrial (sob solo classificado como Regosol). Concluíram que a profundidade de instalação não afetou a uniformidade da irrigação e que a IGSs aumentou em 14% a eficiência do uso da água, pois manteve a superfície do solo seca.

Estudando o rendimento e as características qualitativas do melão submetido à IGS e IGSs (0,2 e 0,4 m de profundidade) sob ambiente controlado (utilizando solo classificado como Neossolo Flúvico), Monteiro et al. (2008) observaram melhor desempenho da cultura quando submetida a IGSs instalada a 0,2 m de profundidade, pois apresentou maior massa média de fruto e uma produção 13% maior em relação à IGS.

Com objetivo de avaliar a produção do tomateiro para processamento industrial sob diferentes profundidades de instalação dos gotejadores (0,2; e 0,4 m), irrigação por aspersão e IGS em Latossolo Vermelho-Escuro de textura argilosa, Marouelli e Silva (2002) observaram melhor desempenho do gotejo instalado a 0,2 m. Isso se deve a maior produtividade e à eficiência de uso da água (que apresentou médias estatisticamente iguais à IGS) e ao menor número de

frutos podres (devido à superfície do solo e da cultura permanecerem secos) comparado aos tratamentos com IGS e por aspersão. A menor eficiência de uso da água foi constatada no gotejo instalado a 0,4 m, devido à maior deficiência de água em que as plantas foram submetidas e a percolação de água aplicada abaixo do sistema radicular.

Barreto et al. (2009) verificaram o efeito da IGS e IGSs (0,1 e 0,2 m de profundidade) e espaçamentos entre emissores (0,5 e 0,8 m) em função do potencial hídrico da folha de cafeeiro em solo argiloso. Observaram que o gotejador instalado a 0,1 m de profundidade e com espaçamento de 0,5 m proporciona a melhor hidratação ao cafeeiro (maior potencial hídrico), o que se deve ao melhor desenvolvimento radicular observado e, conseqüentemente, maior capacidade de aproveitamento da água disponível desse tratamento.

Resende et al. (2004) testaram sete modelos de tubos gotejadores do tipo subsuperficial (modelos não compensantes) quanto ao processo de intrusão radicular, utilizando a cultura da cana-de-açúcar sob condições controladas (utilizando Latossolo Vermelho Amarelo). Foram adotadas duas profundidades de instalação (0,15 e 0,3 m) e três condições de enraizamento (úmido: mantido próximo à capacidade de campo; seco: só era irrigado quando potencial matricial de água no solo atingia -80 kPa; sem cultivo: sem nenhuma cultura e com irrigações idênticas à condição úmida). Ao final, os autores afirmam que a condição de enraizamento úmido não foi suficiente para reduzir o potencial de intrusão e que as profundidades de instalação do gotejador testadas não apresentaram efeito significativo. Por último, ressaltaram a necessidade de adequação dos gotejadores quanto à intrusão e, ou redução de seus efeitos. Em trabalho similar, Faria et al. (2004) observaram que o tratamento úmido resultou em maiores níveis de redução de vazão e, embora com menor magnitude, a profundidade de instalação de 0,3 m reduziu a vazão de emissão dos gotejadores quando comparado com 0,15 m de profundidade de instalação. Ao avaliar a intrusão de raízes de eucalipto em 14 gotejadores, Melo et al. (2010) concordou com os resultados obtidos nos trabalhos apresentados anteriormente (FARIA et al., 2004; RESENDE et al., 2004) e ainda ressaltaram que nenhum gotejador demonstrou ser imune à intrusão radicular, mesmo aqueles com barreira física e recomendados para uso enterrado.

Apesar das vantagens apresentadas pela técnica da irrigação por gotejamento, cumpre destacar que não existe um sistema de irrigação melhor que outro, mas aquele que melhor se adapta à determinada região (clima, solo, topografia, etc.) e às condições econômicas do irrigante. Em contrapartida, a IGSs surge como método eficiente e seguro, permitindo a aplicação

de água de reúso com menor impacto ao meio ambiente e contaminação dos trabalhadores e alimentos. No entanto, estudos mais específicos (estrutura física do gotejador; tratamento de água; manejo de irrigação; profundidade de instalação, etc.) devem ser realizados para melhoria do método quanto à sua longevidade, intrusão radicular, entupimento, eficiência etc., o que permitirá uma ampliação do uso do método (mesmo em culturas com baixo valor econômico), já que o custo de investimento será diluído pelo aumento da vida útil da técnica.

#### **4.3 Efluente de esgoto tratado aplicado sobre a cana-de-açúcar: avaliações no Brasil**

O estudo envolvendo o emprego de efluente de esgoto (EET) tratado sobre a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é relativamente recente. Neste tópico, serão apresentados alguns resultados de pesquisas brasileiras relacionadas ao reúso de EET.

Ao avaliar o aporte de nutrientes e o estado nutricional da cultura de cana-de-açúcar (via diagnose foliar) submetida à IGSs (irrigação por gotejamento subsuperficial) com EET em Piracicaba-SP, Gomes et al. (2009) concluíram que o efluente supriu todas as necessidades de fósforo (P) e enxofre (S) e, ainda, proporcionou incrementos significativos de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e zinco (Zn) quando comparado ao tratamento sem irrigação.

Durante 16 meses de sucessivas irrigações com EET na cultura da cana-de-açúcar em Lins-SP, Leal et al. (2009b) avaliaram os efeitos da salinidade e sodicidade do solo sob aplicação de diferentes lâminas de irrigação baseado na evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ):  $T_0$ = sequeiro;  $T_{100} = 1 \cdot ET_c$ ;  $T_{150} = 1,5 \cdot ET_c$ ; e  $T_{200} = 2 \cdot ET_c$ . Independente do volume aplicado, verificou-se que a sodicidade aumentou ao longo do tempo. Utilizando os dados de condutividade elétrica (CE) da solução do solo notou-se que a salinidade aumentou no período de irrigação com efluente, sendo observada, na última amostragem, diminuição destes valores na camada de 0-0,2 m de solo (reduzindo de 0,68 para 0,37 dS m<sup>-1</sup>, em média), o que ocorreu devido à interrupção da irrigação para maturação da cana-de-açúcar. Os autores concluem que a cana-de-açúcar é uma cultura promissora para irrigação com EET em curto prazo, já que não foram observadas perdas na produtividade no decorrer do seu ciclo. Em trabalho similar, Leal et al. (2009a) avaliaram a produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de 50% da necessidade de nitrogênio mineral em todos os tratamentos, menos no  $T_0$ . Observaram aumento na produtividade da cultura após irrigações com EET. Entretanto, lâminas maiores que  $T_{100}$  não proporcionaram aumento de

rendimento e, além disso, resultaram em pequenas alterações no pH e cátions trocáveis no solo durante o experimento.

Comparando as quantidades de nutrientes aportados e extraídos, produtividade e influência do manejo na cana-de-açúcar sob irrigação com EET em Lins-SP, Blum et al. (2009) observaram que a compactação do solo afetou negativamente a produção entre dois ciclos da cana. Na cana planta as irrigações aumentaram tanto a produção quando as exportações de nutrientes, sendo produzidos, em média, 227 t ha<sup>-1</sup> com aplicação de EET e 152 t ha<sup>-1</sup> para o tratamento controle. No entanto, o tráfego de máquinas sob condições de solo úmido provocou a compactação do solo na área experimental e, conseqüentemente, redução da produção e extração de nutrientes pelas plantas, sendo obtidas, em média, 66 t ha<sup>-1</sup> com aplicação de EET e 65 t ha<sup>-1</sup> para o tratamento controle. Nas 3ª e 4ª socas, Blum et al. (2012) adequaram os tratamentos quando à lâmina de EET aplicada e adicionaram tratamentos com ou sem fosfogesso. Segundo os autores, a irrigação com EET e a aplicação de fosfogesso apresentou efeito sinérgico sobre o conteúdo de nitrogênio e de enxofre nas plantas e, ainda, não observaram efeitos dos tratamentos no rendimento de colmo (devido à compactação do solo observada na colheita da cana planta). Por fim, concluíram que o fósforo e o nitrogênio aportados na irrigação com EET devem ser considerados na recomendação de adubação.

Deon et al. (2010) analisaram a produtividade e a qualidade tecnológica (dois ciclos) após o emprego de diferentes lâminas de irrigação com EET (variando entre 0 e 200% da ETc) e redução em 50% da dose de nitrogênio recomendada para a cultura da cana-de-açúcar. Os resultados demonstram que a irrigação utilizando EET proporciona aumento de produção, sendo que o tratamento com 100% da ETc apresentou ganhos de 17,13 e 25,76 t ha<sup>-1</sup>, para 1ª e 2ª soca, respectivamente; e o tratamento com 200% da ETc resultou em 19,84 e 40,47 t ha<sup>-1</sup> para 1ª e 2ª soca, respectivamente, ambos em relação à testemunha sem irrigação. Com relação aos parâmetros tecnológicos, apenas o teor de BRIX (teor de sólidos solúveis do caldo) apresentou redução nos tratamentos irrigados para a 1ª soca, os demais parâmetros não sofreram alterações significativas, tanto na 1ª quanto na 2ª soca.

Freitas et al. (2013) avaliaram os efeitos do reúso de EET na irrigação da cana-de-açúcar em Fortaleza-CE, onde observaram maior média de produtividade e densidade de plantas para cana irrigada com EET (245,37 t ha<sup>-1</sup> e 115.920 plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente) em comparação com cana irrigada com água potável (177,48 t ha<sup>-1</sup> e 99.642 plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente), o que

está associado às maiores concentrações de nutrientes observadas no EET. Independente da qualidade de água utilizada, os autores observaram aumento gradativo da produção e densidade de plantas com aumento da lâmina aplicada.

Estas experiências brasileiras demonstram que a aplicação de EET na agricultura, em especial na cultura da cana-de-açúcar sob condições edafoclimáticas tropicais e subtropicais, pode se tornar uma opção viável para aumento da produtividade, economia com fertilizantes inorgânicos e água potável associado a menor degradação ambiental, o que proporciona uma melhoria da qualidade de vida de toda população, visto que a saúde pública é beneficiada. Por outro lado, avaliações multidisciplinares quanto ao uso de EET (especialmente sobre técnicas de disposição e manejo) necessitam ser realizadas em médio e longo prazo, visto que os efeitos acumulados da aplicação desse resíduo podem atuar de forma danosa sobre determinados ambientes.

#### **4.4 Técnica TDR na estimativa do conteúdo de água no solo**

Há anos, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para determinar o conteúdo de água no solo. Em pesquisas científicas, o conhecimento dessa grandeza está atrelado ao uso da técnica da irrigação, com ênfase em manejo, determinação de bulbos úmidos, percolação profunda de água, dentre outros.

Em campo, as principais técnicas de avaliação da eficiência de aplicação de água desconsideram a redistribuição no perfil do solo, relacionando apenas a aplicação em superfície. Segundo Barreto Filho et al. (2000), o conceito de uniformidade de distribuição de água, introduzido por Christiansen em 1942, refere-se à variabilidade da lâmina de água aplicada ao longo da superfície da área irrigada – considerando coeficientes estatísticos de uniformidade. Entretanto, tais coeficientes não são suficientes para quantificar a variação da irrigação sobre a produção das culturas, já que não levam em consideração os efeitos relacionados com as propriedades físicas do solo e, principalmente, da distribuição espacial da água aplicada no interior do mesmo (FRIZZONE et al., 2007). Portanto, ao considerar a redistribuição de água no solo, a uniformidade de aplicação em sistema de irrigação localizado poderá alcançar maiores índices (ALVES et al., 2011), além de fornecer informações relevantes que podem ser utilizadas em adequações aos manejos de irrigação empregados.



O monitoramento da umidade do solo possibilita a realização do manejo da irrigação em diversos cultivos, para tanto, são considerados alguns métodos de determinação classificados como diretos ou indiretos (que estimam a umidade a partir de outras propriedades do solo), dentre eles pode-se citar: 1) método direto: o método gravimétrico – considerado o padrão; 2) métodos indiretos: termalização de nêutrons; tensiometria; resistência elétrica; reflectometria no domínio do tempo – TDR (SOUZA e MATSURA, 2002; FRANCO, 2009); e reflectometria no domínio da frequência – FDR (FRANCO, 2009).

Dentre os métodos apresentados, a técnica TDR fornece leituras instantâneas do conteúdo de água no solo *in situ* e, por isso, vem sendo utilizada em diversos trabalhos que procuram aumentar a eficiência da irrigação e, conseqüentemente, reduzir os possíveis danos ao meio ambiente (GONÇALVES, 1997; SIQUEIRA et al., 2008; VIEIRA et al., 2010).

Desenvolvida por Topp et al. (1980), o método da TDR baseia-se na determinação do tempo de propagação de um pulso eletromagnético que percorre hastes paralelas de sondas instaladas no solo. Segundo Souza e Matsura (2003), esse tempo varia conforme a constante dielétrica no qual a sonda está inserida, ou seja, quando instalada no solo essa constante é afetada por seus elementos constituintes: ar, partículas minerais e água.

Diversos pesquisadores (TOPP et al., 1980; DALTON e VAN GENUCHTEN, 1986; NOBORIO, 2001; ROBINSON et al., 2003) relatam que o valor aproximado da constante K é 1 para o ar, entre 3 e 10 para as partículas minerais e 78,5 a 81,0 para água. Logo, a maior influência nos valores da constante dielétrica aparente –  $K_a$  (denominação dada à constante dielétrica estimada no meio ar-partículas minerais-água) são proporcionados pelas variações de água no solo.

Nesse sentido, Topp et al. (1980), por meio de modelagem empírica, obtiveram uma relação entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água no solo, denominada Equação Universal de Topp (Equação 1).

$$\theta = 4,3 \times 10^{-6} K_a^3 - 5,5 \times 10^{-4} K_a^2 + 2,92 \times 10^{-2} K_a - 5,3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

em que:

$\theta$  = conteúdo volumétrico de água do solo (%);

$K_a$  = constante dielétrica aparente (adimensional).

Apesar da Equação de Topp et al. (1980) ser denominada Universal, ela não é aplicável a todos os tipos de solo, já que o ajuste obtido pode comprometer a precisão dos dados quando utilizado em solos específicos, levando à necessidade de calibrações específicas para algumas classes de solo (ROBINSON et al., 1994; OTTO e ALCAIDE, 2001; TOMMASELLI e BACCHI, 2001; TEIXEIRA et al., 2003; CICHOTA e VAN LIER, 2004). Segundo Coelho et al. (2006), o modelo de Topp não leva em consideração as propriedades físicas do solo (é um modelo empírico), o que pode levar à imprecisão dos resultados.

Trabalhando em um Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP, Souza e Matsura (2003) utilizaram uma equação de calibração *in loco* (Equação 2 – SOUZA et al., 2001), visto que a calibração de Topp não se comportou de forma adequada no tipo de solo estudado (textura fina e argilosa). Vale ressaltar que Souza et al. (2001) desenvolveram e comparavam a Equação 2 com a Equação Universal de Topp, obtendo diferenças de até 20% na umidade do solo.

$$\theta = 3 \times 10^{-5} K_a^3 - 0,0017 K_a^2 + 0,0415 K_a - 0,0603 \quad (R^2 = 0,98) \quad (2)$$

Convém frisar que a técnica da TDR, além de estimar o conteúdo de água do solo, permite estimar o valor da condutividade elétrica do solo – CE (ROBINSON et al., 2003). Giese e Tiemann (1975), propuseram a Equação 3 para estimar a CE do solo pela técnica da TDR:

$$CE = \frac{K_p}{Z_c} * \left( \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right) \quad (3)$$

em que:

CE = condutividade elétrica do solo ( $S \, m^{-1}$ );

Kp = constante de célula da sonda (determinada experimentalmente);

Zc = impedância do cabo (50 ohm);

$\rho$  = coeficiente de reflexão (relação entre a voltagem aplicada pela voltagem refletida, varia entre “-1” e “+1”).

Otto e Alcaide (2001) testaram a utilização de TDR (modelo Trime FM) e tensiômetros na determinação da curva de retenção de água no solo e compararam essas curvas de retenção com as obtidas via placa de Richards em solo franco-arenoso de origem aluvial na Espanha (classificado como “Typic Xerofluvent”). Observaram elevada relação entre a umidade obtida via

TDR e a umidade volumétrica real, indicando boa correlação entre a constante dielétrica aparente e umidade volumétrica. Entretanto, relataram que a utilização de sondas com dois diferentes comprimentos de haste, 0,10 e 0,15 m, superestimam os valores de umidade volumétrica em 10 e 38%, respectivamente (com dados de umidade transformados a partir da Equação 1). Além disso, concluíram que a umidade do solo obtida via placa de Richards superestima os valores observados em campo, devido ao aprisionamento de ar provocado pela saturação do solo em campo no sentido descendente. Os autores ainda relatam que, se o manejo de irrigação for realizado utilizando pelo método clássico (obtenção da curva de retenção por placa de Richards em laboratório), irrigações antes do necessário poderão ser realizadas e, conseqüentemente, observado encharcamento do solo e, ou perda de água por percolação.

Outro ponto importante diz respeito à forma como a sonda é inserida no solo, vertical ou horizontal em relação à superfície. Teixeira et al. (2003) compararam as estimativas de umidade volumétrica obtidas por meio de gravimetria com as estimadas com TDR (*Easy Test® Dublin – Poland*), utilizando 3 diferentes equações de calibração e variando as formas de inserção da sonda – vertical e horizontalmente (com duas hastes de 0,1 m de comprimento e 0,002 m de diâmetro). Não encontraram diferença entre as umidades estimadas com TDR quando associado às duas orientações de instalação das sondas com as equações de calibração. Entretanto, os autores frisam que resultados diferentes podem ser obtidos ao se utilizar sondas com maiores comprimentos de haste, se tornando mais susceptível ao efeito do gradiente espacial de umidade do solo, já que o volume amostrado é maior. Tal efeito pode ser minimizado quando as sondas são instaladas na horizontal, porém, para sua instalação é necessário que sejam abertas trincheiras, ocasionando perturbações na estrutura do solo e prejudicando leituras reais em campo.

Robinson et al. (1994) analisaram a influência de três minerais de ferro (goethita, hematita e magnetite) sobre a calibração do TDR. Para tanto, realizam misturas de cada um desses minerais com areia de sílica em proporções conhecidas. Tanto a hematita quanto a goethira afetam as formas de ondas obtidas na *waveforms*, mas produzem uma pequena superestimação no conteúdo de água. Entretanto, a magnetita apresenta maior incerteza na estimativa dos resultados, já que 15% de magnetita proporcionou uma incerteza de 60% na estimativa do conteúdo de água.

Existem outros fatores que afetam a relação entre a constante dielétrica ( $K_a$ ) e o conteúdo de água do solo, a partir do uso da técnica TDR, como densidade e porosidade do solo

(MALICKI et al., 1996) presença de óxidos de ferro e alumínio (ANDRADE et al., 2003, PREVEDELLO et al., 2007; KAISER et al., 2010); teor de argila (KAISER et al., 2010); necessidade de calibração *in loco* (ROBINSON et al., 1994; OTTO e ALCAIDE, 2001; TOMMASELLI e BACCHI, 2001; TEIXEIRA et al., 2003; CICHOTA e VAN LIER, 2004); e o contato entre as hastes da sonda e o solo, pois as leituras sofrem interferência do valor de  $K_a$  do ar. Além disso, o alto custo de investimento (SOUZA e MATSURA, 2002; CICHOTA e VAN LIER, 2004) pode ser considerado um fator limitante ao uso da TDR.

Em contrapartida, a técnica da TDR apresenta diversas vantagens: coleta e avaliação de conteúdo de água em tempo real, não destrutiva (CICHOTA e VAN LIER, 2004; COELHO et al. 2005; SOUZA et al., 2006; KAISER et al., 2010); não apresenta risco com radiação (DALTON e VAN GENCHTEN, 1986); possibilidade de automação, acoplamento em multiplexadores e coleta contínua dos dados (TOPP et al., 1980; COELHO e OR, 1996; CICHOTA e VAN LIER, 2004; COELHO et al. 2005); apresenta-se como opção para ser utilizada em outros setores da agricultura, em indústrias e na construção civil, onde há necessidade de leituras de umidade em grandes volumes em tempo real (SOUZA et al., 2006).

A uniformidade de aplicação de água pela irrigação é fundamental para o sucesso de lavouras irrigadas, pois há possibilidade de algumas plantas estarem recebendo maior ou menor quantidade de água e, com isso, estar havendo perdas por evaporação, escoamento superficial ou percolação profunda e, sobretudo, uma produtividade desuniforme e abaixo de todo potencial que a técnica da irrigação possibilita. Assim, a avaliação da redistribuição de água no perfil do solo se torna indispensável, visto que a dinâmica da água na matriz do solo pode proporcionar maior ou menor uniformidade de irrigação. Nesse sentido, acredita-se que a técnica TDR possa ser utilizada como ferramenta na gestão de recursos hídricos para a agricultura irrigada.

#### **4.5 Salinidade e sodicidade do solo**

Vários são os fatores que podem tornar um solo salino, como, por exemplo, a utilização de água de irrigação com altos níveis de sais. Já sodicidade do solo é o resultado de elevadas concentrações de sódio em relação à capacidade de troca de cátions (CTC) – geralmente isso é observado quando as concentrações ultrapassam 15%. Essa relação é denominada de porcentagem de sódio trocável (PST) e expressa a quantidade de sódio retida no complexo de troca iônica, indicando a possibilidade do solo de se expandir ou contrair (RICHARDS, 1954).

Em geral, a salinidade atua diretamente no rendimento das culturas, sob efeitos osmóticos; já a sodicidade pode provocar danos às propriedades físico-químicas do solo (EMBRAPA, 2004).

A PST é determinada pela Equação 4.

$$PST = \left( \frac{Na}{CTC} \right) * 100 \quad (4)$$

em que:

PST = percentagem de sódio trocável (%);

Na = sódio trocável ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ );

CTC = capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

A salinização do solo proporciona rendimentos distintos nas plantas, já que um vegetal pode responder de forma distinta a diferentes níveis de salinidade do solo, o que se deve à capacidade de ajuste às propriedades osmóticas da planta, ou seja, as plantas apresentam maior capacidade de absorver água em solos considerados salinos (AYERS e WESTCOT, 1994). Em geral, essa dinâmica de determinadas plantas se torna uma característica desejável mundialmente, visto que apresentam capacidade de ser cultivada em solos naturalmente ou, até mesmo, artificialmente salinos.

Há décadas a comunidade científica vem estabelecendo limites de tolerância de diversas culturas à salinidade. Segundo Ayers e Westcot (1994), praticamente todas as plantas apresentam rendimento total quando se utiliza água com CE inferior a  $0,7 \text{ dS m}^{-1}$ . Os mesmos autores apresentam os limites de tolerância à salinidade pelas culturas agrícolas, baseando-se no conceito de tolerância relativa (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação das plantas quanto aos limites de tolerância à salinidade em função da quantidade de sais presentes na solução do solo ou na água de irrigação.

| Classificação                       | Condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) |                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|
|                                     | Solo (extrato de saturação)                   | Água de irrigação |
| Sensível                            | < 1,3                                         | < 0,87            |
| Moderadamente sensível              | 1,3 a 3,0                                     | 0,87 a 2,0        |
| Moderadamente tolerante             | 3,0 a 6,0                                     | 2,0 a 4,0         |
| Tolerante                           | 6,0 a 10,0                                    | 4,0 a 6,7         |
| Impróprio ao cultivo <sup>(1)</sup> | > 10,0                                        | > 6,7             |

<sup>(1)</sup> Impróprio ao cultivo da maioria das culturas, exceto quando a produtividade seja aceitável. (Fonte: adaptado de AYERS e WESTCOT, 1994).

Considerando a tolerância de diversas plantas a níveis de CE, Ayers e Westcot (1994) apresentam a tolerância da cultura da cana-de-açúcar à salinidade. Na Figura 2 é apresentada a influência dos níveis de CE do solo (extrato de saturação) e CE da água de irrigação sobre a produtividade relativa da cana-de-açúcar.

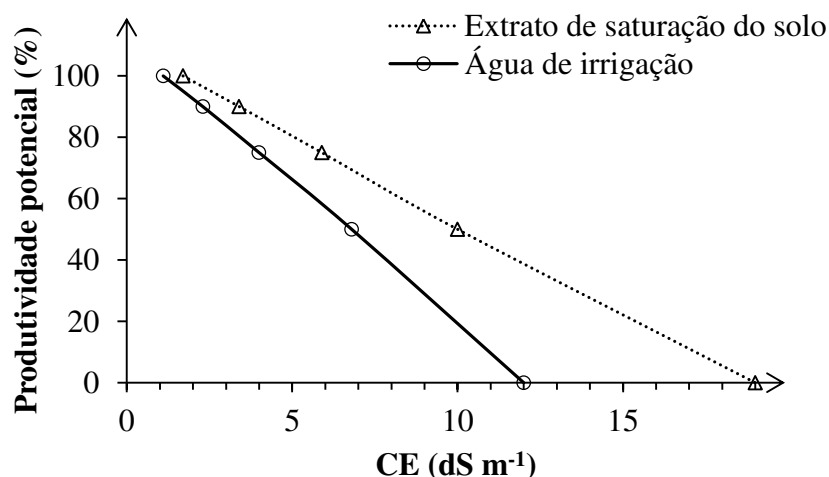


Figura 2. Produtividade potencial da cultura da cana-de-açúcar (%) em função da CE (condutividade elétrica, dS m<sup>-1</sup>) do extrato de saturação do solo e da CE da água de irrigação. (Fonte: adaptado de AYERS e WESTCOT, 1994).

Com intuito de classificar os solos quanto aos parâmetros sódico-salinos, o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos elaborou uma relação de parâmetros, levando em consideração: CE, PST e pH (RICHARDS, 1954). A classificação de Richards (1954) é mundialmente utilizada, porém, a Sociedade Americana de Ciência do Solo recomendou que o limite entre classes de CE baixasse para 2 dS m<sup>-1</sup> – obtido via extrato de saturação do solo (ABROL et al., 1988; BOHN et al., 2001). A classificação do solo quanto aos parâmetros sódico-salinos e limites estabelecidos por Richards (1954) e com redução do limite de CE, segundo proposto por Abrol et al. (1988) e Bohn et al. (2001), é apresentada na sequência:

- Solo não sódico e não salino: CE < 2 dS m<sup>-1</sup>; PST < 15%; pH < 8,5
- Solo salino: CE > 2 dS m<sup>-1</sup>; PST < 15 %; pH < 8,5
- Solo sódico: CE < 2 dS m<sup>-1</sup>; PST > 15 %; pH ≥ 8,5
- Solo salino-sódico: CE > 2 dS m<sup>-1</sup>; PST > 15 %; pH < 8,5

Vale lembrar que os valores de PST são influenciados pela água de irrigação, notadamente pela razão de absorção de sódio (RAS). Este índice relaciona as concentrações de  $\text{Na}^+$  com as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na água de irrigação. Pode ser calculada pela Equação 5.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\left( \frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2} \right)^{0.5}} \quad (5)$$

em que:

- RAS = razão de absorção de sódio ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ );
- $\text{Na}^+$  = concentração de sódio ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ );
- $\text{Ca}^{2+}$  = concentração de cálcio ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ );
- $\text{Mg}^{2+}$  = concentração de magnésio ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

Como a água de irrigação apresenta concentração natural de sais (sendo que essa concentração pode ser ainda maior quando águas residuárias são utilizadas), irrigações sucessivas proporcionam acréscimo crescente de sais no solo. Além disso, o processo de retirada de água pela planta (transpiração) acaba proporcionando um acúmulo e, conseqüentemente, concentração de sais no solo (AYERS e WESTCOT, 1994). Dessa forma, o manejo da irrigação deve ser empregado de forma criteriosa, além da necessidade de se efetuar medidas mitigadoras (como drenagem e lixiviação dos sais).

Andrade et al. (2004) objetivaram avaliar o comportamento dos sais no solo e a ação das chuvas na lixiviação dos mesmos em área irrigada do Ceará, notaram que as chuvas proporcionaram a lixiviação de sódio adicionado pela irrigação para camadas mais profundas no perfil do solo. Dessa forma, nota-se a existência de um controle natural em regiões com altos índices pluviométricos, o que permite a retirada do possível excesso de sais no perfil do solo e, antagonicamente, possibilita que ocorram sérios impactos ambientais com a possível percolação profunda.

Segundo Bond (1998), as principais limitações de uso do solo atual e futuro quanto à aplicação de efluente de esgoto doméstico (EET) como água de irrigação são: 1- lixiviação excessiva de nitrato para lençóis freáticos; 2- salinidade; e 3- sodicidade.

Problemas na estrutura do solo podem ser observados concomitantemente ao fornecimento de altos teores de sódio ao solo, gerando pouca infiltração de água e aeração do solo e, conseqüentemente, redução do crescimento das plantas (RHOADES et al., 1992; SONON et al., 2012), além de promover a dispersão da argila e redução da permeabilidade do solo (RHOADES et al., 1992; VARALLO et al., 2010).

Segundo Tillman e Surapaneni (2002), cada tipo de solo apresenta um comportamento peculiar, onde o pH, CE, tipo de argila, quantidade e qualidade da matéria orgânica podem interagir e expressar diferentes níveis de dispersão do solo. Assim, o sucesso ou fracasso da irrigação com águas residuárias está intimamente ligado à interação com a qualidade da água, cultura utilizada e as características do solo (MOJID e WYSEURE, 2013).

Diversos trabalhos vêm estudando os atributos físicos do solo após serem submetidos à aplicação de EET, os quais apresentam grande variação nos resultados. Mojid e Wyseure (2013) observaram melhoria da agregação do solo (pelo acúmulo de matéria orgânica), aumento da porosidade total (PT) e redução da densidade do solo (Ds). O aumento da argila dispersa em água reduziu a macroporosidade (Macro) e a condutividade hidráulica, além de aumentar a Ds, microporosidade (Micro) e capacidade de campo (SOUZA et al., 2010). Abedi-Koupai et al. (2006) observaram aumento da Ds tanto com aplicação de EET quanto de ARS, o que ocorreu em função da maior dispersão da argila. Gonçalves et al. (2010), observaram ligeiro aumento da Macro e redução Micro após sucessivas irrigações com EET e água naturalmente sódica e, ainda, afirmaram que o carbono orgânico não proporcionou efeito sobre essas classes de poros, sendo que o íon sódio provocou a desagregação da estrutura do solo e a dispersão da argila, alterando a porosidade do solo. Por outro lado, Tzanakakis et al. (2011) relataram redução da densidade do solo e um aumento correspondente à PT e Macro, pois houve aumento da estabilidade de agregados influenciado pela matéria orgânica e sem ocorrência dos efeitos das altas concentrações de  $\text{Na}^+$  aplicadas pelo EET.

Ao tentar simular um ambiente de formação de mudas de essências florestais utilizando Neossolo Quartzarênico, Lucena et al. (2006) aplicaram duas qualidades de água (água de abastecimento e EET) em sacos plásticos com capacidade de 2 L de solo (unidade experimental), realizando pesagens diárias em cada saco para que o mesmo fique com umidade correspondente a 80% da capacidade de campo. Após o período experimental (100 dias) foram coletadas amostras de solo em cada unidade experimental para análise química, dentre elas:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , pH,



porcentagem de bases trocáveis (V%), PST, entre outras. Ao avaliar os dois tipos de água de irrigação, constataram que o efluente sempre proporcionou maior aporte dos elementos avaliados, incluindo  $\text{Na}^+$  e, conseqüentemente, a PST. O fato de o experimento ter sido mantido a 80% da capacidade de campo contribuiu para acúmulo de sais, logo, os autores recomendam a aplicação de EET como fonte de água para irrigação, desde que sejam utilizados sistemas abertos para que se evite o acúmulo de sódio no solo.

Sabe-se que não existe água isenta de sais, sendo que o uso de fertirrigação e a aplicação de água residuária podem ser fontes consideráveis para o aumento do teor de sais, inclusive do teor de sódio e elementos tóxicos à planta e prejudiciais ao meio ambiente. Fato que torna nítida a importância de se analisar e acompanhar a qualidade da água de irrigação (independente da origem) e o comportamento do solo ao receber aplicações de água quanto aos diferentes parâmetros sódico-salinos. Essas medidas podem fornecer informações valiosas na prevenção e, ou mitigação da salinização e sodificação dos solos, incluindo a adoção de manejos eficientes e sustentáveis, principalmente quando são utilizadas águas com qualidade inferior.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Localização e clima

O experimento foi desenvolvido no campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP) localizado na Cidade Universitária “Zeferino Vaz”, distrito de Barão Geraldo, Campinas-SP, latitude 22°48’57’’S, longitude 47°03’33’’W e com altitude média de 640 m. Segundo a Embrapa (2006), o solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico.

O clima, segundo a classificação de Köppen, é de transição entre Cwa e Cfa, subtropical de altitude, seco no inverno e chuvoso e quente no verão, com temperatura média anual de 22,4°C e precipitação média anual em torno de 1.424,5 mm, sendo que 80% da média precipitada anualmente se concentram entre os meses de outubro a março, ou seja, 1.141 mm (CEPAGRI, 2013). Na Tabela 4 é apresentada a série histórica de temperatura e precipitação, já na Figura 3 é apresentado o valor mensal acumulado de precipitação, evapotranspiração de referência – utilizando método de Pennam-Montheith da FAO (ALLEN et al., 1998), e temperatura média observada no decorrer do período experimental.

Tabela 4. Temperatura (mínima, média e máxima) e precipitação acumulada (média) observadas na estação meteorológica situada na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP entre junho/1988 e outubro/2008.

| Mês           | Temperatura do ar (°C) |       |        | Precipitação (mm) |
|---------------|------------------------|-------|--------|-------------------|
|               | Mínima                 | Média | Máxima | Média             |
| Janeiro       | 19,8                   | 24,7  | 29,7   | 280,3             |
| Fevereiro     | 19,9                   | 24,9  | 30,0   | 215,9             |
| Março         | 19,6                   | 24,7  | 29,9   | 162,3             |
| Abril         | 17,6                   | 23,1  | 28,5   | 58,6              |
| Maio          | 14,5                   | 20,0  | 25,5   | 63,3              |
| Junho         | 12,9                   | 18,8  | 24,8   | 35,4              |
| Julho         | 12,3                   | 18,5  | 24,8   | 43,3              |
| Agosto        | 13,8                   | 20,5  | 27,2   | 22,9              |
| Setembro      | 15,8                   | 21,8  | 27,8   | 59,5              |
| Outubro       | 17,6                   | 23,3  | 29,1   | 123,5             |
| Novembro      | 18,3                   | 23,8  | 29,3   | 155,6             |
| Dezembro      | 19,1                   | 24,3  | 29,6   | 203,9             |
| Mínima mensal | 12,3                   | 18,5  | 24,8   | 22,9              |
| Média mensal  | 16,8                   | 22,4  | 28,0   | 118,7             |
| Máxima mensal | 19,9                   | 24,9  | 30,0   | 280,3             |

Fonte: CEPAGRI (2013).

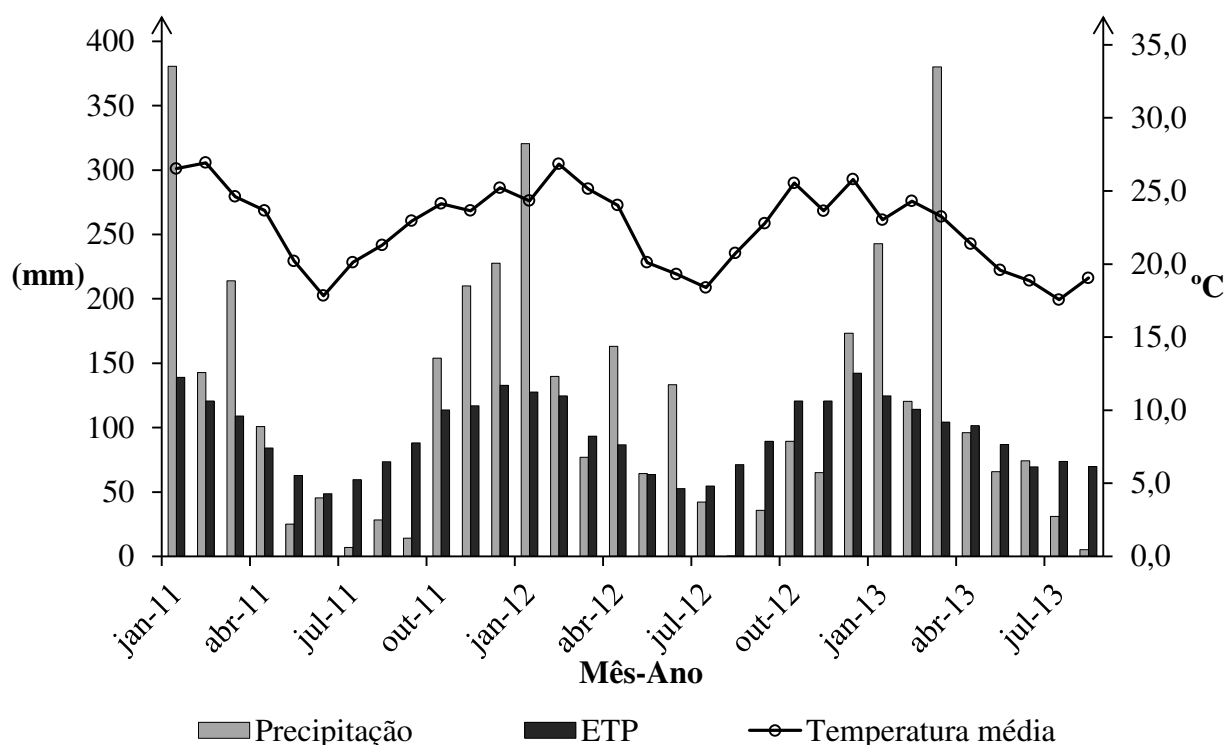


Figura 3. Dados mensais de precipitação, evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub> – estimado pelo método de Pennam-Montheith) e temperatura média observada no decorrer da cana planta (maio/2011 a setembro/2012) e 1ª soca (outubro/2012 a agosto/2013) de cana-de-açúcar, Campinas-SP.

## 5.2 Caracterização da área experimental

Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas para caracterização físico-química do solo antes da implantação do experimento em campo (no mês de fevereiro de 2011). Para tanto, quatro trincheiras (4 repetições) foram abertas aleatoriamente na área experimental (0,8x0,8x1,0 m, comprimento, largura e profundidade, respectivamente) e coletadas cinco amostras deformadas e outras cinco indeformadas nas profundidades médias das camadas: 0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m (por meio de um amostrador de Ulhand e anéis de volume conhecido). Posteriormente, as amostras foram transportadas ao Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP e colocadas para secar ao ar e à sombra e, em seguida, peneiradas em peneira de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA) – amostras deformadas. Já as amostras indeformadas (anéis metálicos de volume conhecido) foram revestidas com filme plástico e, em seguida, com papel alumínio (ambos para evitar a perda de umidade), sendo acondicionadas em resfriador com temperatura controlada até que fossem manipuladas. Salienta-se que todas as análises para caracterização física do solo foram realizadas no Laboratório de

Solos da FEAGRI/UNICAMP e as análises para caracterização química do solo foram realizadas em Laboratório terceirizado.

A partir das amostras de solo coletadas, foram realizadas as seguintes análises: composição granulométrica, grau de dispersão (% de argila dispersa em relação à argila total), densidade do solo e das partículas, micro, macro e porosidade total, curva de retenção de água no solo e condutividade hidráulica do solo saturado (EMBRAPA, 1997) – apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à composição granulométrica ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e grau de dispersão (GD, %), Campinas-SP.

| Camada (m) | Fator             | Areia grossa | Areia fina | Silte  | Argila | GD    |
|------------|-------------------|--------------|------------|--------|--------|-------|
| 0,0-0,2    | Média             | 131,75       | 118,13     | 178,12 | 572,00 | 67,68 |
|            | CV <sup>(1)</sup> | 6,04         | 7,06       | 9,20   | 2,68   | 8,11  |
| 0,2-0,4    | Média             | 113,13       | 115,88     | 160,63 | 610,38 | 71,93 |
|            | CV                | 6,37         | 3,98       | 14,72  | 4,34   | 5,84  |
| 0,4-0,6    | Média             | 97,50        | 110,00     | 141,50 | 651,00 | 66,63 |
|            | CV                | 9,23         | 11,21      | 8,84   | 2,59   | 11,05 |
| 0,6-0,8    | Média             | 95,00        | 110,25     | 145,38 | 649,37 | 73,31 |
|            | CV                | 9,22         | 10,11      | 6,83   | 1,25   | 26,94 |
| 0,8-1,0    | Média             | 96,67        | 108,33     | 152,67 | 640,75 | 59,02 |
|            | CV                | 8,80         | 4,26       | 2,54   | 1,34   | 0,26  |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

Tabela 6. Caracterização inicial do solo da área experimental quanto à densidade de partícula ( $D_p$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ ), densidade do solo ( $D_s$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ ), macroporosidade (Macro,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), microporosidade (Micro,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), porosidade total (PT,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ,  $\text{cm h}^{-1}$ ), Campinas-SP.

| Camada (m) | Fator             | Parâmetros |       |       |       |      |       |
|------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|------|-------|
|            |                   | $D_p$      | $D_s$ | Macro | Micro | PT   | $K_s$ |
| 0,0-0,2    | Média             | 2,70       | 1,38  | 0,11  | 0,41  | 0,52 | 3,29  |
|            | CV <sup>(1)</sup> | 2,83       | 2,65  | 18,79 | 4,03  | 2,36 | 46,76 |
| 0,2-0,4    | Média             | 2,69       | 1,49  | 0,07  | 0,43  | 0,50 | 0,83  |
|            | CV                | 3,15       | 0,93  | 18,10 | 3,86  | 2,24 | 75,59 |
| 0,4-0,6    | Média             | 2,69       | 1,36  | 0,08  | 0,41  | 0,49 | 2,60  |
|            | CV                | 2,79       | 4,04  | 21,70 | 3,86  | 0,49 | 54,05 |
| 0,6-0,8    | Média             | 2,72       | 1,20  | 0,11  | 0,39  | 0,50 | 1,38  |
|            | CV                | 1,92       | 5,51  | 13,63 | 7,37  | 3,50 | 53,91 |
| 0,8-1,0    | Média             | 2,72       | 1,24  | 0,12  | 0,40  | 0,52 | 3,98  |
|            | CV                | 4,16       | 3,92  | 7,13  | 4,39  | 3,32 | 79,81 |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

Foi determinada a estabilidade de agregados em água utilizando a técnica do tamisamento a úmido, segundo metodologia de Yoder (1936). Foram utilizados os agregados com diâmetro entre 6,35 e 2,00 mm e um conjunto de peneiras com malha de 2,00; 1,00; 0,50 e 0,125 mm na agitação via úmida e, em seguida, determinados os parâmetros: diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA), segundo as Equações 6 e 7, respectivamente. Na Tabela 7 são apresentados os valores médios de DMP e IEA.

$$DMP = \sum_{i=1}^n \frac{M_i * D_i}{M_T} \quad (6)$$

$$IEA = \frac{M_T - M_{<0,125}}{M_T} * 100 \quad (7)$$

em que:

- $M_i$  = massa de agregados da classe i (g);
- $D_i$  = diâmetro médio da classe i (mm);
- $M_T$  = massa total de agregados descontado o conteúdo de água do solo (g);
- $M_{<0,125}$  = massa de agregados menor que 0,125 mm.

Tabela 7. Caracterização inicial do solo da área experimental quanto ao diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e índice de estabilidade de agregados (IEA, %), Campinas-SP.

| Camada (m) | Fator             | Parâmetros |       |
|------------|-------------------|------------|-------|
|            |                   | DMP        | IEA   |
| 0,0-0,2    | Média             | 1,99       | 95,23 |
|            | CV <sup>(1)</sup> | 14,87      | 1,11  |
| 0,2-0,4    | Média             | 1,76       | 94,78 |
|            | CV                | 18,79      | 1,20  |
| 0,4-0,6    | Média             | 1,28       | 90,04 |
|            | CV                | 38,21      | 5,21  |
| 0,6-0,8    | Média             | 1,10       | 86,47 |
|            | CV                | 37,78      | 5,39  |
| 0,8-1,0    | Média             | 0,97       | 83,47 |
|            | CV                | 20,16      | 5,07  |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

Foi utilizada uma mesa de tensão para determinar a retenção de água nas amostras indeformadas de solo, sob as tensões de 2 e 6 kPa, e câmara de pressão de Richards, sob as tensões de 10, 20, 30, 50, 75, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa. Posteriormente, para obtenção da

curva de retenção de água no solo, equações foram ajustadas baseando-se no modelo de Van Genuchten (1980), utilizando o programa computacional *Soil Water Retention Curve – SWRC*, desenvolvido por Dourado Neto et al. (2000) – Figura 4.

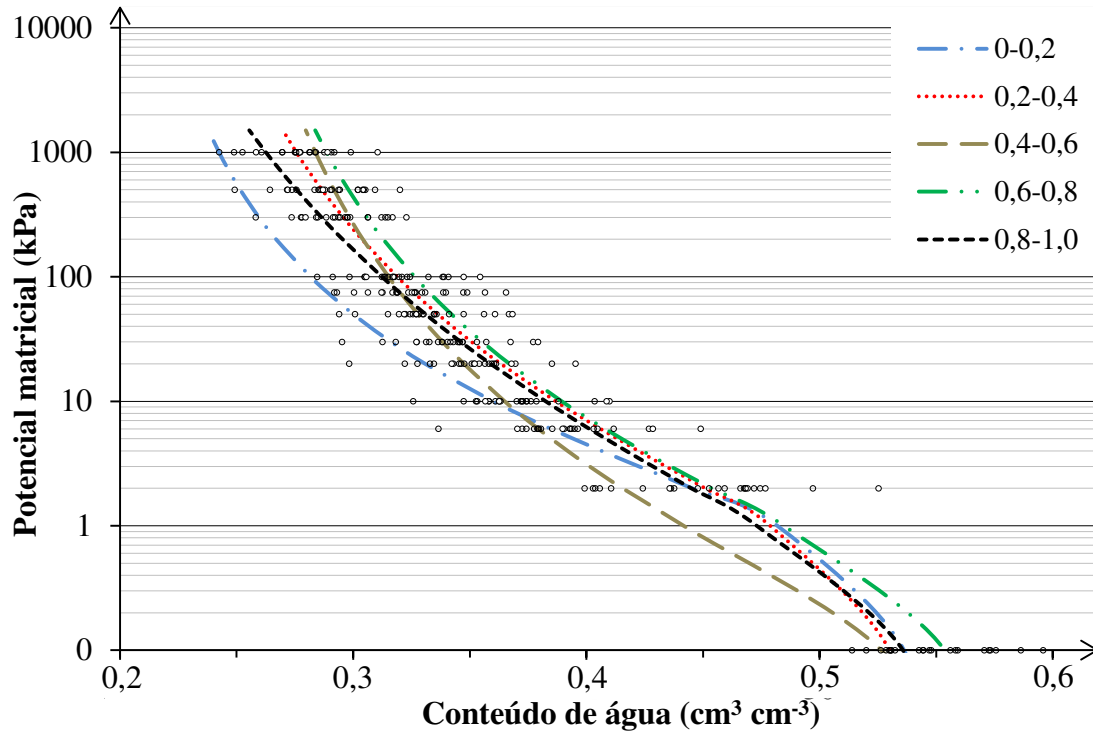


Figura 4. Curva de retenção de água no solo ajustada conforme modelo de Van Genuchten (1980) para cinco diferentes camadas avaliadas em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

Onde:

$$\begin{aligned} \theta_{0,0-0,2} &= 0,204 + \frac{(0,541 - 0,204)}{\left[1 + (1,207 * \psi)^{1,306}\right]^{0,234}} R^2 = 0,96; & \theta_{0,2-0,4} &= 0,202 + \frac{(0,537 - 0,202)}{\left[1 + (1,877 * \psi)^{1,201}\right]^{0,167}} R^2 = 0,93; \\ \theta_{0,4-0,6} &= 0,231 + \frac{(0,556 - 0,231)}{\left[1 + (7,987 * \psi)^{1,202}\right]^{0,168}} R^2 = 0,97; & \theta_{0,6-0,8} &= 0,233 + \frac{(0,565 - 0,233)}{\left[1 + (2,784 * \psi)^{1,225}\right]^{0,184}} R^2 = 0,84; \\ \theta_{0,8-1,0} &= 0,144 + \frac{(0,548 - 0,144)}{\left[1 + (3,128 * \psi)^{1,152}\right]^{0,132}} R^2 = 0,95; & & \text{em que, } \psi = \text{potencial matricial (kPa)} \end{aligned}$$

Medidas de resistência do solo à penetração (RP) foram realizadas com auxílio de um penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone igual a 30° e tamanho de haste de 0,7 m. Os cálculos para obtenção da RP foram realizados conforme Stolf (1991), utilizando a “fórmula dos holandeses”. Para tanto, 10 leituras (repetições) foram realizadas de forma aleatória na área experimental. Além disso, amostras de solo foram coletadas (com trado a

cada 0,1 m de profundidade até 0,7 m) para se determinar o conteúdo de água simultaneamente à leitura da RP (Tabela 8).

Tabela 8. Caracterização inicial da área experimental quanto à resistência e à penetração do solo (RP, MPa) e conteúdo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), Campinas-SP.

| Camada (m) | RP    |                   | Conteúdo de água |      |
|------------|-------|-------------------|------------------|------|
|            | Média | CV <sup>(1)</sup> | Média            | CV   |
| 0,0-0,1    | 1,54  | 25,83             | 0,34             | 9,35 |
| 0,1-0,2    | 2,39  | 16,84             | 0,33             | 3,76 |
| 0,2-0,3    | 2,74  | 15,30             | 0,37             | 3,68 |
| 0,3-0,4    | 2,42  | 14,19             | 0,37             | 5,03 |
| 0,4-0,5    | 2,44  | 12,05             | 0,35             | 9,68 |
| 0,5-0,6    | 2,07  | 18,83             | 0,37             | 4,14 |
| 0,6-0,7    | 2,75  | 18,31             | 0,38             | 8,91 |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios dos resultados da análise química do solo antes da implantação do experimento, realizada em Laboratório terceirizado, conforme métodos descritos por Camargo et al. (2009). Foram coletadas nove amostras na camada de 0-0,2 m de profundidade.

Tabela 9. Caracterização inicial da área experimental quanto à fertilidade do solo na camada superficial (0-0,2 m) antes da instalação do experimento, Campinas-SP.

| Elemento químico            | Unidade                        | Média | CV <sup>(1)</sup> |
|-----------------------------|--------------------------------|-------|-------------------|
| pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) | -                              | 5,62  | 4,77              |
| Fósforo (P)                 | $\text{mg dm}^{-3}$            | 19,33 | 24,12             |
| Enxofre (S)                 | $\text{mg dm}^{-3}$            | 15,56 | 18,81             |
| Sódio (Na)                  | $\text{mg dm}^{-3}$            | 1,90  | 30,23             |
| Potássio (K)                | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 5,70  | 24,66             |
| Cálcio (Ca)                 | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 51,00 | 23,69             |
| Magnésio (Mg)               | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 9,44  | 16,83             |
| Alumínio (Al)               | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | ALD   | -                 |
| H + Al <sup>(2)</sup>       | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 32,56 | 20,50             |
| CTC <sup>(3)</sup>          | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 98,70 | 9,79              |
| RAS <sup>(4)</sup>          | $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ | 0,047 | 19,32             |
| MO <sup>(5)</sup>           | $\text{g kg}^{-1}$             | 37,56 | 10,41             |
| CE <sup>(6)</sup>           | $\text{dS m}^{-1}$             | 0,096 | 17,78             |
| PST <sup>(7)</sup>          | %                              | 0,083 | 21,62             |
| V <sup>(8)</sup>            | %                              | 66,40 | 13,22             |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; <sup>(2)</sup> Acidez potencial; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions; <sup>(4)</sup> Razão de absorção de sódio; <sup>(5)</sup> Matéria orgânica; <sup>(6)</sup> Condutividade elétrica; <sup>(7)</sup> Porcentagem de sódio trocável; <sup>(8)</sup> Saturação de bases.

Também foi realizada a caracterização do perfil do solo quanto aos parâmetros sódico-salinos e classificados segundo limites estabelecidos por Richards (1954) (Tabela 10), conforme critérios descritos no item 4.5.

Tabela 10. Caracterização inicial da área experimental quanto aos parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo Richards (1954), Campinas-SP.

| Prof. (m)         | Parâmetros |                   |                    |                    |                         |
|-------------------|------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
|                   | pH         | CE <sup>(1)</sup> | PST <sup>(2)</sup> | RAS <sup>(3)</sup> | Classif. <sup>(4)</sup> |
| 0,0-0,2           | 5,5        | 0,189             | 0,072              | 0,014              | Normal                  |
| 0,2-0,4           | 5,6        | 0,098             | 0,099              | 0,016              | Normal                  |
| 0,4-0,6           | 5,7        | 0,092             | 0,086              | 0,013              | Normal                  |
| 0,6-0,8           | 5,8        | 0,103             | 0,102              | 0,015              | Normal                  |
| 0,8-1,0           | 5,9        | 0,098             | 0,125              | 0,018              | Normal                  |
| CV <sup>(5)</sup> | 3,90       | 53,57             | 25,09              | 19,77              | -                       |
| Média geral       | 5,7        | 0,116             | 0,097              | 0,015              | -                       |

<sup>(1)</sup> Condutividade elétrica, dS m<sup>-1</sup>; <sup>(2)</sup> Porcentagem de sódio trocável, %; <sup>(3)</sup> Razão de absorção de sódio, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>;

<sup>(4)</sup> Classificação do solo segundo critérios de Richards (1954); <sup>(5)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

### 5.3 Variedade de cana-de-açúcar

Foi utilizada a variedade de cana-de-açúcar RB86-7515, desenvolvida pelo Programa de Melhoramento Genético de Cana da Universidade Federal de Viçosa - UFV. Segundo Barbosa et al. (2001), as principais características dessa variedade são: maturação média, ótima brotação, tolerante ao carvão e ferrugem e reação intermediária ao mosaico e escaldadura, crescimento inicial rápido e perfilhamento médio com talos de diâmetro uniforme, hábito de crescimento ereto e de fácil remoção da palha.

Ao listar algumas recomendações de manejo, Hoffmann et al. (2008) relatam que alguns problemas podem ocorrer relacionados à variedade RB86-7515 cultivada em ambientes favoráveis e com alto potencial de produção. Dentre estes, se destacam: possível incidência de estrias vermelhas nas folhas, atraso na maturação e possibilidade de tombamento associada à alta produtividade agrícola.

### 5.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental empregado foi em blocos casualizados (DBC), montado em esquema fatorial 2x2x2+1 (duas profundidades de instalação do tubo gotejador, P: 0,2 e 0,4 m; duas qualidades de água, Q: água de reservatório superficial e efluente de esgoto tratado; complementação nutricional via fertirrigação, N: com ou sem complementação nutricional; e a



testemunha sem irrigação (SI) e com adubação convencional), totalizando nove tratamentos com cinco repetições (Tabela 11).

Tabela 11. Descrição dos tratamentos empregados na área experimental.

| Tratamento | Simbologia | Descrição                                                   |
|------------|------------|-------------------------------------------------------------|
| T1         | SI         | Sem irrigação;                                              |
| T2         | EET-CN-0,2 | EET <sup>(1)</sup> + com nutrição; P <sup>(3)</sup> = 0,2 m |
| T3         | EET-SN-0,2 | EET + sem nutrição; P = 0,2 m                               |
| T4         | EET-CN-0,4 | EET + com nutrição; P = 0,4 m                               |
| T5         | EET-SN-0,4 | EET + sem nutrição; P = 0,4 m                               |
| T6         | ARS-CN-0,2 | ARS <sup>(2)</sup> + com nutrição; P = 0,2 m                |
| T7         | ARS-SN-0,2 | ARS + sem nutrição; P = 0,2 m                               |
| T8         | ARS-CN-0,4 | ARS + com nutrição; P = 0,4 m                               |
| T9         | ARS-SN-0,4 | ARS + sem nutrição; P = 0,4 m                               |

<sup>(1)</sup> Efluente de Esgoto Tratado; <sup>(2)</sup> Água de reservatório superficial; <sup>(3)</sup> Profundidade de instalação do tubo gotejador.

Cada parcela experimental foi constituída de três linhas duplas de cana-de-açúcar de 17 m (área total da parcela: 91,8 m<sup>2</sup>), sendo a área útil composta pela linha dupla central (linha efetiva, LE) descontando 2 m de comprimento em cada extremidade da parcela (bordadura), totalizando 13 m (área útil da parcela: 23,4 m<sup>2</sup>). Também foram consideradas as duas linhas duplas da extremidade como bordadura (linha de bordadura, LB). O espaçamento entre duas linhas de cana-de-açúcar foi de 0,4 m de distância uma da outra (linha dupla), com espaçamento da entrelinha de 1,4 m; sendo o tubo gotejador instalado nos tratamentos irrigados no centro da linha dupla, conforme apresentado na Figura 5. Por último foram delimitadas as áreas para instalação de sensores (SE), estimativa de produtividade (PRD) e amostragem do sistema radicular (RZ) sobre a LE em cada parcela experimental (Figura 5).

Vale ressaltar que o monitoramento com sensores foi realizado nos três blocos centrais (blocos 2, 3 e 4) e as avaliações tecnológicas e da produtividade em todos os blocos (5 repetições). Com relação à avaliação radicular e às propriedades físicas do solo, foram avaliados os tratamentos fertirrigados e a testemunha (T1, T2, T4, T6 e T8) em três repetições.

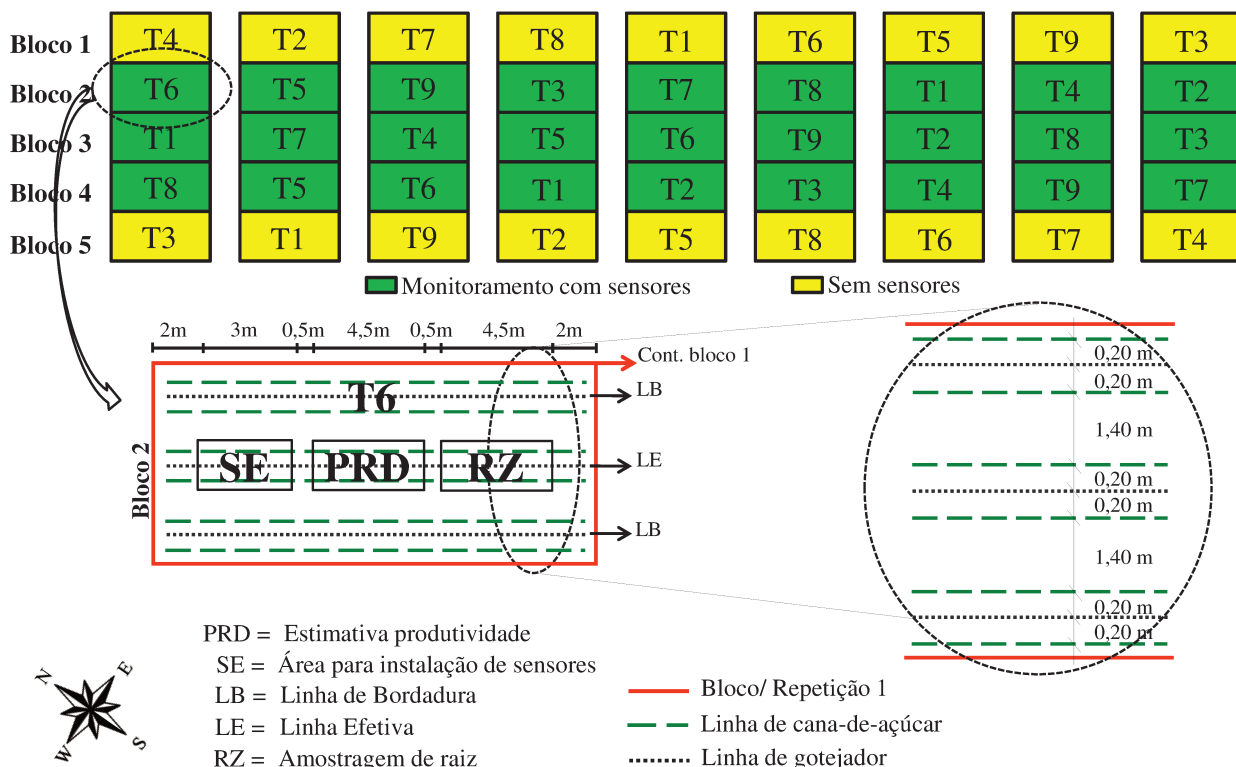


Figura 5. Croqui da área experimental e disposição dos tratamentos.

#### 5.4.1 Sistema de irrigação e plantio

O sistema de irrigação adotado foi o gotejamento subsuperficial, utilizando o tubo gotejador Dripnet PC AS (marca Netafim®) com duas vazões de  $1,0 \text{ L h}^{-1}$  (espaçados a cada 0,55 m) e  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  (espaçados a cada 0,65 m). Segundo o fabricante (NETAFIM, 2014), esses gotejadores apresentam sistema que mantém a vazão uniforme com pressão de serviço variando entre 40 e 250 kPa; o gotejador é do tipo labirinto com ampla passagem de água, o que aumenta a resistência do gotejador a entupimentos; e, ainda, possuem sistema anti-sifão que previne a entrada de impurezas externas para dentro do gotejador.

Ressalta-se que os gotejadores utilizados na presente pesquisa foram doados pela empresa Netafim®, resultando no uso de duas diferentes vazões do gotejador:  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  para aplicação de EET e  $1,0 \text{ L h}^{-1}$  para aplicação de ARS. Apesar dessa diferença entre vazões, Elaiuy et al. (2012) testaram os gotejadores citados e observaram a formação de faixa molhada uniforme no sentido da linha gotejadora independente da qualidade de água (EET ou ARS) e da vazão ( $1,0$  e  $1,6 \text{ L h}^{-1}$ ) utilizada.

O plantio da cana-de-açúcar ocorreu entre 18 e 23 de maio de 2011, utilizando sistema em espaçamento combinado/linha dupla (onde duas linhas de cana-de-açúcar foram espaçadas em 0,4 m e a entrelinha em 1,4 m) a 0,3 m de profundidade, conforme ilustrado na Figura 5. Para tanto, sulcos foram abertos mecanicamente (Figura 6a, 6c e 6d) e, em seguida, os toletes/colmos (com média de três gemas cada) foram distribuídos na proporção de 15 a 18 gemas por metro.

Para instalação dos tubos gotejadores foi desenvolvida ferramenta (Figura 6b) no Laboratório de Protótipos da FEAGRI/UNICAMP, que permitiu a instalação em duas profundidades (0,2 e 0,4 m). O processo de instalação dos tubos ocorreu após o plantio da cana-de-açúcar (no centro das filas duplas, conforme Figura 5 e 6c), uma vez que cada implemento agrícola precisava ser acoplado ao trator e funcionava de forma independente.

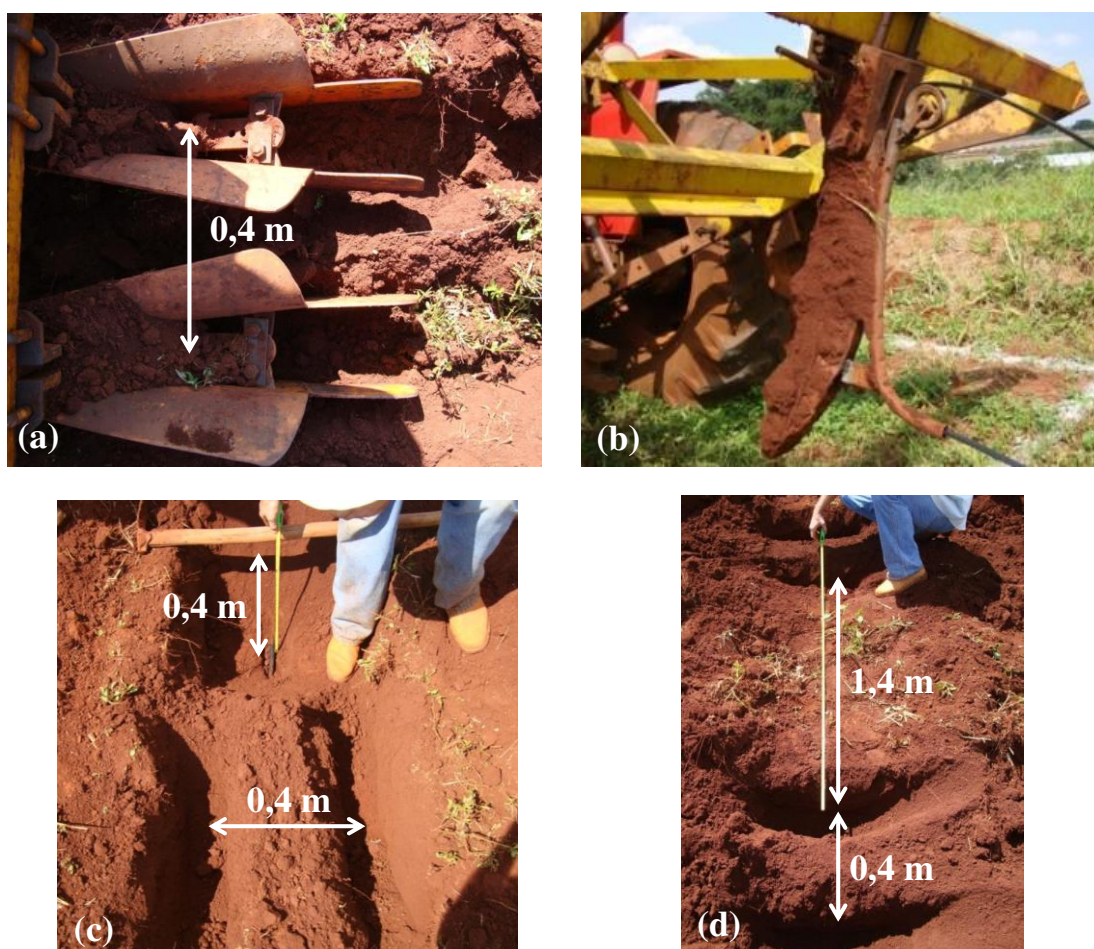


Figura 6. Sulcador regulado para plantio da cana-de-açúcar em fileiras duplas de 0,4 m (a); instrumento para instalação do tubo gotejador em duas profundidades: 0,2 e 0,4 m (b); espaçamento filas duplas (c); espaçamento entre filas duplas (d).

Foram instalados dois conjuntos de cabeçal de controle: um para aplicação de ARS e o outro para aplicação de EET (Figura 7a e 7b, respectivamente). Após a instalação de todo o sistema de irrigação, o conjunto foi acionado com os registros dos finais de linha abertos para lavagem dos tubos gotejadores.

A retrolavagem era realizada após cada evento de irrigação, sendo utilizada água potável para limpeza dos filtros, a fim de evitar a entrada de impurezas na areia do filtro. Ao final de cada ciclo da cultura foi realizada a limpeza do sistema com aplicação de cloro e ácido clorídrico para evitar possíveis entupimentos.



Figura 7. Cabeçal de controle com dois conjuntos de pressurização do sistema de irrigação: aplicação de água de reservatório superficial (a); aplicação de efluente de esgoto tratado (b).

#### 5.4.2 Qualidade da água de irrigação

Foram utilizadas duas qualidades de água para irrigação, sendo a primeira referente à água de reservatório superficial (ARS) captada dentro das instalações da UNICAMP (parque ecológico) e a segunda qualidade de água utilizada foi o efluente de esgoto tratado (EET), sendo o esgoto captado nas instalações da FEAGRI/UNICAMP (composto da mistura de dejetos domésticos, sanitários e laboratórios).

Para o tratamento de esgoto foram utilizados reatores anaeróbicos compartimentados e sistema pós-tratamento composto de seis *wetlands* (dispostas em dois conjuntos paralelos com três leitos/piscinas preenchidos com brita e cultivados com macrófitas), conforme Figura 8. Após o tratamento, o EET era bombeado e armazenado em reservatório com capacidade para 15 m<sup>3</sup> e, posteriormente, utilizado como água de irrigação. Maiores detalhes construtivos do sistema de tratamento de esgoto podem ser encontrados em Zanella (2008).

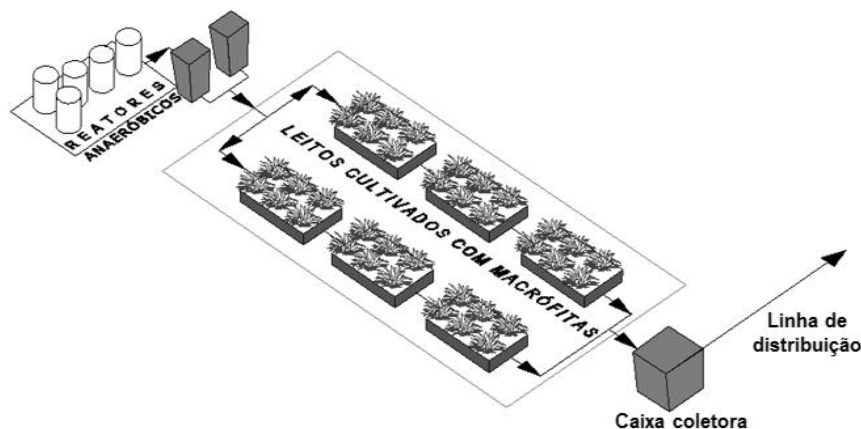


Figura 8. Sistema de tratamento de esgoto da FEAGRI/UNICAMP. (Fonte: adaptado de ZANELLA, 2008).

A análise química da água de irrigação foi realizada mensalmente, coletando-se amostras de ARS e EET após a passagem pelo filtro de areia e mantendo as amostras em caixas térmicas com gelo. As amostras foram devidamente identificadas e encaminhadas a um Laboratório terceirizado, considerando o tempo hábil de transporte para análise dentro do prazo adequado de preservação. Salienta-se que os métodos utilizados seguiram os protocolos descritos pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* – SMEWW (APHA, 2012), e pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (USEPA, 2013). Na Tabela 12 são apresentados todos os parâmetros avaliados, destaca-se que os elementos cobalto (Co), molibdênio (Mo), níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr) e mercúrio (Hg) sempre apresentaram valores abaixo do limite de detecção do equipamento, independente da qualidade da água utilizada ou do ciclo da cana-de-açúcar avaliado.

Em relação ao potencial de risco de entupimento, as qualidades de água utilizadas apresentaram classificação variável. Para o fator físico, o risco foi baixo para ambas as qualidades de água (ARS e EET); o fator químico apresentou níveis moderados a baixos, exceto para ferro total no EET e pH na ARS que apresentaram níveis severos, ambos na cana planta; já



para o fator biológico, a ARS apresentou risco de entupimento baixo e o EET severo (NAKAYAMA e BUKS, 1991).

Tabela 12. Média mensal da análise química da água de reservatório superficial (ARS) e do efluente de esgoto tratado (EET) utilizados na irrigação da cana planta e 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP.

| Elementos analisados         | Unidade                            | Cana planta        |       | 1ª soca    |        |
|------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------|------------|--------|
|                              |                                    | EET                | ARS   | EET        | ARS    |
| Alumínio (Al)                | mg dm <sup>-3</sup>                | 0,04               | 0,23  | 0,03       | 0,04   |
| Boro (B)                     | mg dm <sup>-3</sup>                | 0,11               | ALD   | 0,27       | ALD    |
| Cálcio (Ca)                  | mg dm <sup>-3</sup>                | 18,30              | 4,59  | 19,78      | 3,98   |
| Cobre (Cu)                   | mg dm <sup>-3</sup>                | ALD <sup>(1)</sup> | 0,00  | 0,00       | 0,00   |
| Sulfato (S-SO <sub>2</sub> ) | mg dm <sup>-3</sup>                | ALD                | ALD   | 11,22      | ALD    |
| Ferro (Fe)                   | mg dm <sup>-3</sup>                | 1,60               | 0,47  | 0,88       | 0,22   |
| Fósforo total (P-total)      | mg dm <sup>-3</sup>                | 8,31               | 0,19  | 13,35      | 0,04   |
| Magnésio (Mg)                | mg dm <sup>-3</sup>                | 3,20               | 2,77  | 3,50       | 2,76   |
| Manganês (Mn)                | mg dm <sup>-3</sup>                | 0,07               | 0,03  | 0,07       | 0,02   |
| Nitrogênio total (N-total)   | mg dm <sup>-3</sup>                | 66,70              | 3,20  | 74,76      | 0,91   |
| Nitrato (N-NO <sub>3</sub> ) | mg dm <sup>-3</sup>                | ALD                | ALD   | ALD        | 0,06   |
| Nitrito (N-NO <sub>2</sub> ) | mg dm <sup>-3</sup>                | ALD                | ALD   | 0,03       | 0,02   |
| Potássio (K)                 | mg dm <sup>-3</sup>                | 27,00              | 0,86  | 25,68      | 1,13   |
| Sódio (Na)                   | mg dm <sup>-3</sup>                | 57,60              | 1,61  | 64,50      | 2,20   |
| Zinco (Zn)                   | mg dm <sup>-3</sup>                | 0,10               | 0,04  | 0,07       | 0,07   |
| Cloro total (Cl)             | mg dm <sup>-3</sup>                | ALD                | ALD   | 0,02       | 0,02   |
| SST <sup>(2)</sup>           | mg dm <sup>-3</sup>                | - <sup>(3)</sup>   | -     | 40,00      | 18,00  |
| DBO <sup>(4)</sup>           | mg dm <sup>-3</sup>                | -                  | -     | 7,48       | 2,26   |
| Coliformes totais            | NMP <sup>(5)</sup>                 | -                  | -     | 167.122,50 | 980,00 |
| Condutividade elétrica       | dS m <sup>-1</sup>                 | 0,998              | 0,053 | 1,092      | 0,065  |
| pH (a 20 °C)                 | -                                  | 7,44               | 9,13  | 7,51       | 7,29   |
| RAS <sup>(6)</sup>           | mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> | 3,267              | 0,147 | 3,502      | 0,208  |

<sup>(1)</sup> Abaixo do limite de detecção do equipamento; <sup>(2)</sup> Sólidos suspensos totais; <sup>(3)</sup> Análise não realizada; <sup>(4)</sup> Demanda bioquímica de oxigênio; <sup>(5)</sup> Número mais provável em 100 mL de amostra; <sup>(6)</sup> Razão de absorção de sódio.

#### 5.4.3 Adubação e fertirrigação

A adubação do solo foi realizada conforme recomendações de Rossetto et al. (2010). Assim, ao considerar a análise química do solo (Tabela 9, item 5.2), foram aplicados 30, 80 e 80 Kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, na cana planta; e 120, 40 e 80 Kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, na 1ª soca. Destaca-se que não houve adubação de plantio, já que a análise química do solo demonstrou não haver necessidade de aplicação e, ainda, os tratamentos sem

fertirrigação (T3, T5, T7 e T9) não receberam nenhum tipo de adubação (apenas os nutrientes presentes na própria água de irrigação – EET ou ARS).

Em ambos os ciclos avaliados, a adubação do tratamento testemunha (T1) foi realizada manualmente em cobertura na linha de cultivo (linha dupla) com dosagem integral dos nutrientes, aplicando-se os adubos em agosto de 2011 para cana planta e em janeiro de 2013 para 1ª soca. Os fertilizantes utilizados para aplicação em cobertura foram: ureia (utilizado como fonte de N), MAP (utilizado como fonte de  $P_2O_5$ ) e sulfato de potássio (utilizado como fonte de  $K_2O$ ).

Nos tratamentos fertirrigados (T2, T4, T6 e T8) a adubação ocorreu de acordo com a marcha de absorção de nutrientes da cultura (HAAG et al., 1987) e apresentou frequência semanal. Na cana planta a dosagem utilizada foi idêntica ao T1, sendo aplicado o acumulado dos três primeiros meses em cobertura – conforme o tratamento T1 (já que o sistema de irrigação não estava em funcionamento no início do ciclo), e, na sequência, as doses foram parceladas em 14 aplicações via fertirrigação. Na 1ª soca a adubação ocorreu de forma complementar aos nutrientes presentes na água de irrigação (ARS ou EET). Os fertilizantes utilizados na fertirrigação foram o nitrato de cálcio (utilizado como fonte de N), sulfato de potássio (utilizado como fonte de  $K_2O$ ) e MAP (utilizado como fonte de  $P_2O_5$ ). No Anexo 9.1 são apresentadas as quantidades de nutrientes aplicadas mensalmente no decorrer da cana planta (Tabela 26 e 27) e 1ª soca (Tabela 28 e 29).

### **5.5 Manejo de irrigação e tratos culturais**

A irrigação era realizada duas vezes por semana nos dois ciclos avaliados, exceto nos períodos chuvosos, quando a irrigação era suspensa e mantinha-se a fertirrigação. No final do ciclo, a irrigação foi interrompida 60 e 45 dias antes da colheita (na cana planta e 1ª soca, respectivamente) para maturação da cana-de-açúcar e acúmulo de açúcar.

O manejo de irrigação adotado foi o balanço de água no solo, sendo calculado pela diferença entre o conteúdo de água presente no solo antes da irrigação (obtido pela técnica da TDR) e a capacidade máxima de armazenamento de água (capacidade de campo). Foi considerada a tensão de 20 kPa (umidade média no perfil do solo:  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) para capacidade de campo de acordo com os resultados observados na curva característica (Figura 4; item 5.2).

Na cana-planta, as dimensões de solo consideradas no cálculo da lâmina de irrigação foram: 0,6 m profundidade, 0,4 m para largura de faixa quando utilizado o gotejador de  $1,0 \text{ L h}^{-1}$

e 0,5 m para largura de faixa quando utilizado o gotejador de  $1,6 \text{ L h}^{-1}$ , comprimento de linha de 18 m (17 m de linha + 0,5 m em cada extremidade da linha correspondente ao chicote – ligação entre a derivação e o tubo gotejador). Estudos preliminares para avaliação do bulbo úmido foram realizados com os mesmos gotejadores e na mesma área experimental (ELAIUY et al., 2012), possibilitando o uso das larguras de faixa molhada descritas.

No decorrer do ciclo da cana planta observou-se, após os eventos de irrigação, que a lâmina de água aplicada elevava a umidade do solo acima do requerido, principalmente para os tratamentos com tubo gotejador instalado a 0,4 m de profundidade. Neste ciclo, a equação de calibração do TDR adotada para transformar os dados de Ka (constante dielétrica aparente do solo) em  $\theta_i$  (conteúdo de água no solo antes da irrigação) foi a Equação quadrática geral proposta por Roque (2007) ( $\theta = -0,04805Ka^2 + 2,111Ka + 8,488$ ). Assim, como esta última Equação limita a obtenção de elevadas umidades mesmo quando há leituras de altos valores de Ka, optou-se por utilizar a Equação de Souza et al. (2001) (Equação 2,  $\theta = 3 \times 10^{-5} Ka^3 - 0,0017Ka^2 + 0,0415Ka - 0,0603$ ).

Outro aspecto importante a ressaltar é o pouco aumento do conteúdo de água nas primeiras camadas de solo, principalmente para os tratamentos com tubo gotejador instalado a 0,4 m de profundidade. Desta forma, no ciclo da 1ª soca foi utilizado o perfil de 0,2-0,8 m para o cálculo da lâmina de irrigação dos tratamentos com aplicação de água a 0,4 m e manteve-se o perfil de 0-0,6 m para os tratamentos com aplicação a 0,2 m de profundidade. Na Figura 9 são apresentadas as lâminas de irrigação aplicadas no decorrer da cana planta e da 1ª soca.

Os tratos culturais realizados foram: controle de plantas infestantes com capina manual (2 vezes na cana planta), aplicação de Sempre (totalizando 3 no ciclo da cana planta e 2 na 1ª soca), Velpar K WG (1 aplicação na cana planta), DMA 2,4 -D (2 aplicações na cana planta e 2 na 1ª soca), Glifosato (1 aplicação na 1ª soca). Para o controle de pragas foram utilizados: Evidence 720WG (1 aplicação na cana planta) e Mirex (2 aplicações na cana planta e 2 na 1ª soca).



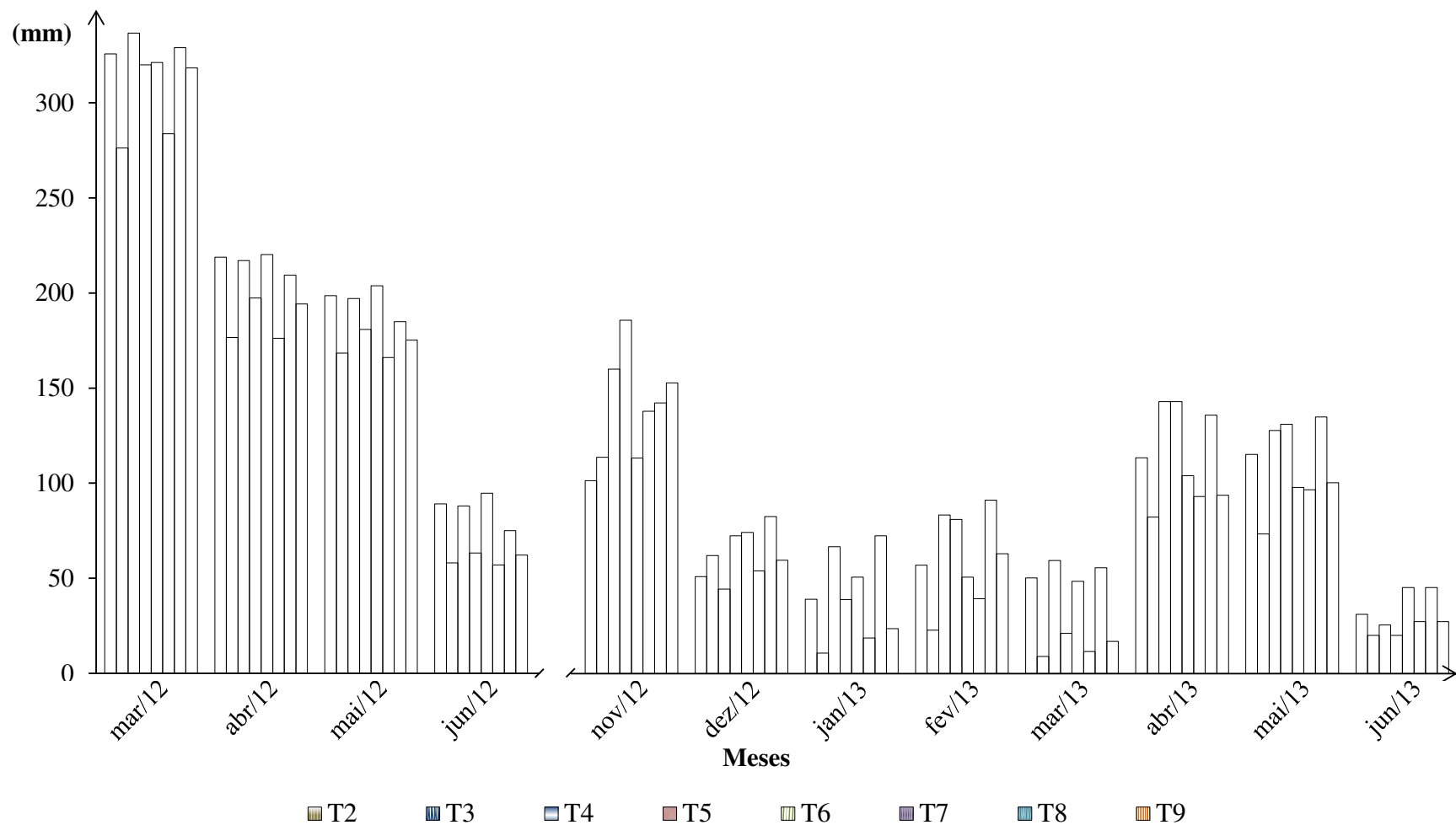


Figura 9. Lâmina mensal de irrigação para oito diferentes tratamentos empregados no decorrer da cana planta e 1ª soca. (Onde: T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

## 5.6 Avaliações

### 5.6.1 Monitoramento do conteúdo de água no perfil do solo

Foi empregado o método indireto da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para estimativa do conteúdo de água no perfil do solo ( $\theta$ ), utilizando o medidor modelo TDR 100 (*Campbell Scientific*<sup>1</sup>, Logan-Utah) equipado com uma interface RS 232, o qual registra o sinal eletromagnético automaticamente para um coletor de dados (*Datalogger CR1000* – *Campbell Scientific*).

Todas as sondas TDR utilizadas (com 0,2 m de comprimento de haste e 6 m de cabo) foram confeccionadas nas instalações do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da FEAGRI/UNICAMP (totalizando 135 sondas), o que permitiu a padronização dos materiais utilizados e da sua confecção, gerando confiabilidade e padrão de leituras de  $K_a$  – constante dielétrica aparente (Figura 10).



Figura 10. Sonda TDR utilizada na experimentação.

Para avaliação do conteúdo de água no perfil do solo foi instalado um conjunto de cinco sondas TDR em cada parcela experimental nas proximidades do tubo gotejador (distância média de 0,1 m), monitorando camadas de 0,2 m de espessura até 1,0 m de profundidade. A Figura 11 apresenta configuração do conjunto de sondas TDR no perfil do solo que formam a área SE (área para instalação de sensores) e a Figura 12 representa a sequência de instalação das sondas TDR em campo.

---

<sup>1</sup> Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.

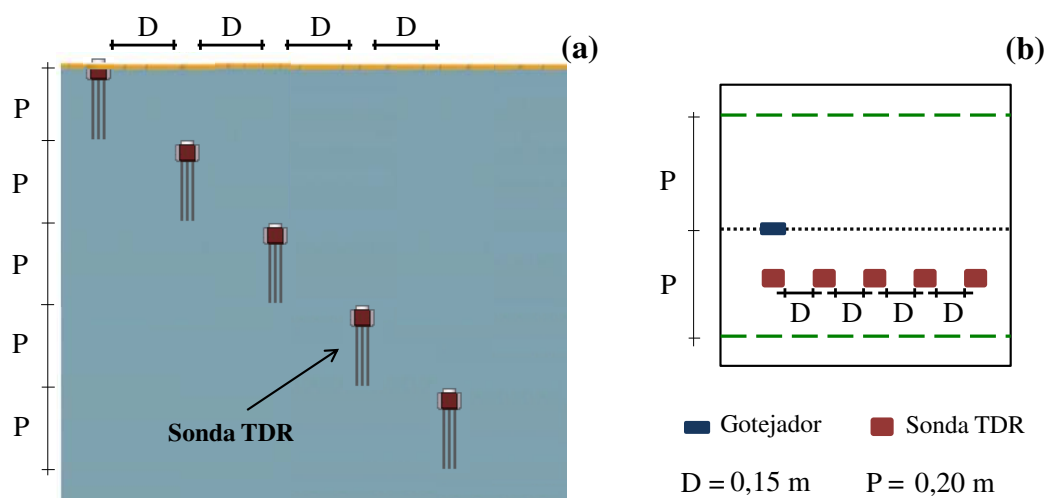


Figura 11. Sondas TDR instalados na área SE: vista do perfil (a) e vista superior (b).



Figura 12. Pontos de instalação das sondas TDR (a); tradagem para abertura de orifícios em maiores profundidades (b); inserção de ferramenta específica para o enterrio das sondas em maiores profundidades (c); visualização dos cabos coaxial após enterrio das sondas TDR (d); suporte e proteção dos conectores (e).

Após a coleta e transformação dos dados de Ka em umidade era possível determinar o armazenamento de água no solo para cada evento de irrigação. Para tanto, foi utilizada a capacidade de campo média no perfil do solo ( $CC = 0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sob tensão de 20 kPa) como limite superior de retenção de água no solo e as umidades inicial –  $\theta_i$  (antes da irrigação) e final –  $\theta_f$  (após a irrigação). Em seguida, foram adotadas outras duas condições de umidade do solo: umidade em déficit –  $\theta_d$  (mesmo após a irrigação a umidade não atingiu a CC) e umidade em excesso –  $\theta_e$  (após a irrigação a umidade ultrapassou a CC). Além disso, também foi calculada a fração de água teórica disponível (Equação 8), sendo os dados confrontados com o valor referência apresentado por Allen et al. (1998) para a cultura da cana-de-açúcar: 0,65 (fração que representa a quantidade de água que pode ser retirada do solo sem que a planta sofra estresse hídrico).

$$f = \frac{(\theta_f - \theta_{\text{pmp}})}{(\theta_{\text{cc}} - \theta_{\text{pmp}})} \quad (8)$$

em que:

- $f$  = fração de água teórica disponível (adimensional);
- $\theta_f$  = umidade após a irrigação ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
- $\theta_{\text{pmp}}$  = umidade no ponto de murcha permanente concentração de cálcio ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
- $\theta_{\text{cc}}$  = umidade na capacidade de campo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

### 5.6.2 Caracterização da salinidade e sodicidade no perfil do solo

As avaliações da salinidade e sodicidade do solo foram realizadas a partir da amostragem/acompanhamento em dois períodos: no início (coletando-se amostras com auxílio de um trado comum) e no final da 1ª soca (coletando-se as amostras diretamente no perfil do solo/parede de uma trincheira). Foram analisados o tratamento testemunha (T1) e os tratamentos fertirrigados (T2, T4, T6 e T8), com três repetições, coletando-se amostras nas camadas de 0,2 m de espessura até 1,0 m de profundidade na posição P0,4 (Figura 13). Posteriormente, foram determinados os parâmetros: CE (condutividade elétrica), pH, RAS (razão de absorção de sódio) e PST (porcentagem de sódio trocável). As análises foram realizadas em Laboratório terceirizado, sendo utilizados os métodos descritos por Camargo et al. (2009) para obtenção dos valores de CE (extrato de saturação do solo, na proporção 1:2, solo e água, respectivamente), pH, cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na) e da capacidade de troca de cátions (CTC). De posse dos resultados, o

perfil do solo foi classificado quanto à salinidade e sodicidade segundo critérios propostos por Richards (1954) (conforme descrito no item 4.5).

### 5.6.3 Caracterização dos atributos físicos no perfil do solo

Ao final da 1ª soca, amostras de solo foram coletadas no tratamento testemunha (T1) e nos tratamentos fertirrigados (T2, T4, T6 e T8), com três repetições para a caracterização física do solo. Para tanto, trincheiras foram abertas com dimensões 0,8x0,8x1,0 m (largura, comprimento e profundidade, respectivamente) perpendicularmente às linhas de plantio, na área “RZ” da Figura 5. Em cada trincheira foram coletadas 20 amostras deformadas e outras 20 indeformadas (Figura 13), localizados no ponto médio das 5 camadas de solo (de 0,2 em 0,2 m até 1,0 m) e 4 distâncias do tubo gotejador (de 0,2 em 0,2 m até 0,6 m; onde: P0= na linha dos gotejadores; P0,2= 0,2 m dos gotejadores; P0,4= 0,4 m dos gotejadores; e P0,6= 0,6 m dos gotejadores).

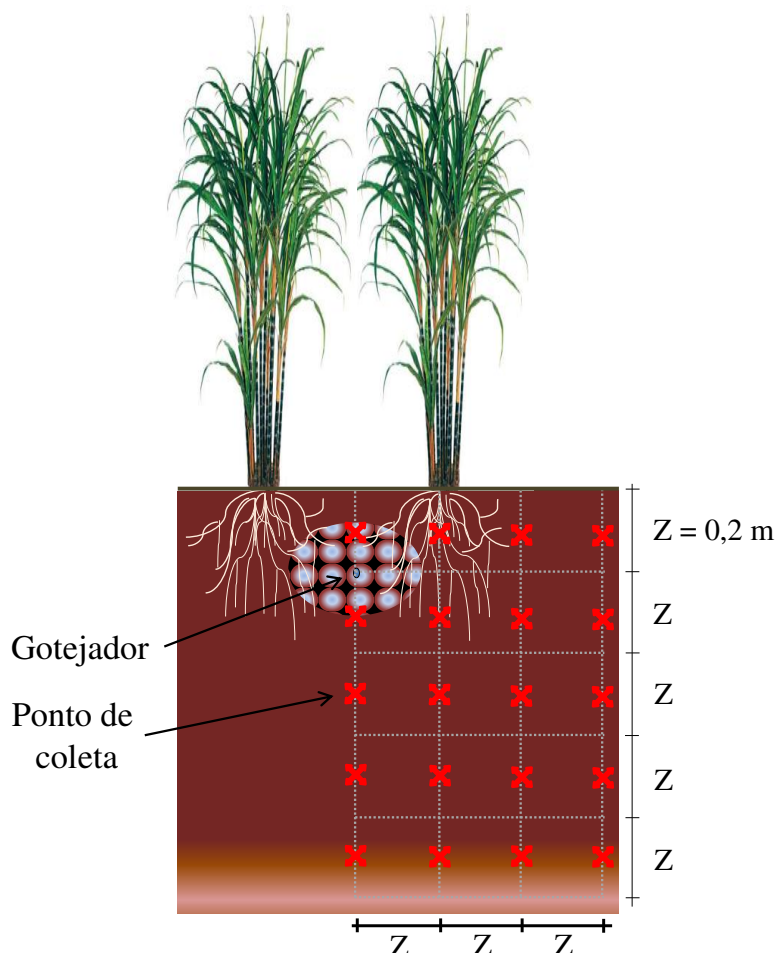


Figura 13. Ponto de coleta de amostras deformadas e indeformadas no perfil do solo.

Após a coleta, as amostras foram levadas ao Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP, onde foram realizadas as seguintes análises: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), índice de estabilidade de agregados (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP), grau de dispersão (GD) e condutividade hidráulica (Ks) – conforme descrito no item 5.2, e resistência do solo à penetração (RP) utilizando equipamento automatizado SoloTrack<sup>2</sup> (Falker®). Para determinar a Ks amostras de solo foram coletadas apenas na projeção do tubo gotejador (ponto 0,0) nas cinco camadas estabelecidas (Figura 13).

#### **5.6.4 Caracterização dos parâmetros vegetativos da cana-de-açúcar**

##### **5.6.4.1 Sistema radicular**

Foi utilizado um equipamento portátil de coleta de imagens das raízes, CI-600<sup>2</sup> (CID Bio-Science, Inc., Camas, Washington, EUA), que permitiu acompanhar o crescimento radicular durante o ciclo da cultura de forma não destrutiva. Para tanto, tubos de acesso de acrílico transparente (diâmetro interno: 64 mm; diâmetro externo: 70 mm; comprimento: 1050 mm) foram instalados no tratamento testemunha (T1) e nos tratamentos fertirrigados (T2, T4, T6 e T8) com três repetições, totalizando 15 pontos de amostragem.

Os tubos foram instalados em paralelo à linha de plantio da cana-de-açúcar (em média, 0,1 m de distância), sob angulação de 45° em relação à superfície do solo, conforme recomendado por Johnson et al. (2001). Aberturas foram feitas com auxílio de um perfurador de solo semimecanizado (marca: Kawashima®<sup>2</sup>; modelo: ED-43; cilindrada: 42,7 cm<sup>3</sup>), utilizando broca com diâmetro de 75 mm e um gabarito para orientar o ângulo de inserção do tubo (Figura 14). O diâmetro da broca foi escolhido para manter a distância máxima de 8 mm entre a parede exterior do tubo e o solo, já que o sensor não capta a luz refletida pelo conjunto solo-raiz em distâncias maiores (CID BIO-SCIENCE, 2011). Vale ressaltar que a extremidade inferior do tubo foi vedada com uma tampa de acrílico, já a extremidade superior com um tampa preta de plástico removível, o que facilita a inserção do sensor e protege contra chuva e raios solares.

---

<sup>2</sup> Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.

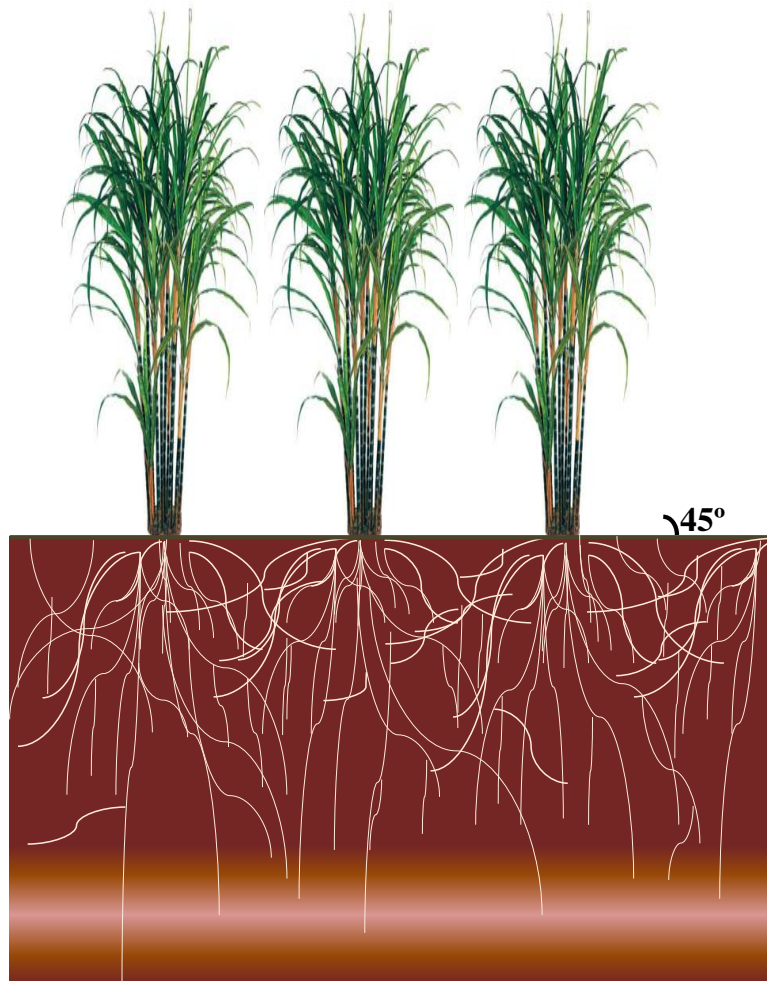




Figura 14. Ferramentas para instalação dos tubos de acrílico: gabarito (a); gabarito com broca formando ângulo de 45° (b).

O monitoramento do sistema radicular ocorreu em dois momentos na 1ª soca da cana-de-açúcar: 1- no estágio final de crescimento dos colmos; 2- no estágio de maturação. Como o tubo foi instalado em diagonal, as imagens das raízes foram coletadas nas camadas 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,45; e 0,45-0,6 m de profundidade, sendo que cada imagem apresentou tamanho uniforme de 21,59 x 19,56 cm, perímetro do tubo de acrílico e comprimento do leitor do escâner, respectivamente. A Figura 15 detalha o tubo de raiz instalado no solo e o escâner CI-600 em operação.

Após a coleta, as imagens foram tratadas em Laboratório utilizando o *software* CI-690 RootSnap! (CID Bio-Science, Inc., Camas, Washington, EUA) para caracterização do sistema radicular quanto aos parâmetros densidade de comprimento radicular (DCR,  $\text{cm cm}^{-2}$ ) e distribuição percentual (%). A DCR foi calculada pela razão entre o comprimento radicular observado em cada camada (cm) e a área de cada imagem ( $21,59 \times 19,56 = 422,30 \text{ cm}^2$ ); já para a distribuição percentual (%) foi considerado o comprimento total até 0,6 m de profundidade e, em seguida, determinada a porcentagem de contribuição das raízes nas quatro diferentes camadas analisadas.





fibra), ATR (açúcar total recuperável) e AR (açúcares redutores do caldo) conforme metodologia descrita pela Consecana (2006). As análises foram realizadas no estágio final do crescimento intenso (uma amostragem) e no estágio de maturação (duas amostragens), sendo amostrados manualmente cinco perfilhos por parcela, identificados e enviados ao Laboratório da Usina Ester.

Em virtude da ocorrência de acamamento (com excessiva quebra de perfilhos) no final da cana planta, foi considerada para estimativa da produção o peso fresco de 5 perfilhos em cinco repetições por tratamento coletados aos 408 DAP (2 meses antes do corte). Na 1ª soca a produtividade foi estimada amostrando-se 1 metro de perfilhos na linha efetiva em cinco repetições por tratamento, coletados aos 348 DAC (momento do corte da cana). Posteriormente, os valores foram transformados em  $t\ ha^{-1}$  para obtenção da estimativa de produção de colmo (EPC). Além disso, foi determinado o rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR), segundo relação:

$$RTR = \frac{ATR * EPC}{1000} \quad (9)$$

em que:

RTR = rendimento teórico de açúcar recuperável ( $t\ ha^{-1}$ );

ATR = açúcar total recuperável ( $kg\ t^{-1}$ );

EPC = estimativa de produção de colmo ( $t\ ha^{-1}$ ).

## 5.7 Análise dos resultados

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando necessário, compararam-se às médias aplicando-se o teste de Tukey (para a avaliação do sistema radicular, salinidade e sodicidade e atributos físicos do solo) ou Scott-Knott (para a avaliação do conteúdo de água no solo, atributos tecnológicos e produtividade da cana-de-açúcar) a 5% de probabilidade de erro, utilizando o programa Sisvar (FERREIRA, 2011).

Para representar os parâmetros avaliados no perfil do solo e na entrelinha de cultivo, mapas foram confeccionados com auxílio do *Software Surfer* versão 8.0, utilizando técnica de interpolação por Krigagem.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Conteúdo de água no perfil do solo

Na Tabela 13 são apresentados os valores da quantidade de água utilizada no ciclo da cultura, composta pela lâmina de precipitação e de irrigação. Vale destacar que no início do ciclo da cana planta não houve irrigação via gotejamento, já que o sistema não estava totalmente instalado (entre maio e outubro de 2011). Assim, irrigações por aspersão foram realizadas mantendo a umidade do solo até a capacidade de campo e as adubações de cobertura parceladas

Tabela 13. Lâmina precipitada (LP, mm), lâmina de água de reservatório superficial (ARS, mm) e de efluente de esgoto tratado (EET, mm) aplicado via irrigação por gotejamento subsuperficial no ciclo da cana planta e da 1ª soca, Campinas-SP.

| Mês/<br>ano           | LP,<br>mm | T-1 | ARS aplicada, mm |       |       |       | EET aplicado, mm |       |       |       |
|-----------------------|-----------|-----|------------------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
|                       |           |     | T-2              | T-3   | T-4   | T-5   | T-6              | T-7   | T-8   | T-9   |
| Cana planta           |           |     |                  |       |       |       |                  |       |       |       |
| Out/11                | 154,0     | 0,0 | - <sup>(1)</sup> | -     | -     | -     | -                | -     | -     | -     |
| Nov/11                | 210,0     | 0,0 | -                | -     | -     | -     | -                | -     | -     | -     |
| Dez/11                | 227,7     | 0,0 | -                | -     | -     | -     | -                | -     | -     | -     |
| Jan/12                | 320,5     | 0,0 | -                | -     | -     | -     | -                | -     | -     | -     |
| Fev/12                | 139,7     | 0,0 | -                | -     | -     | -     | -                | -     | -     | -     |
| Mar/12                | 77,0      | 0,0 | 325,8            | 276,3 | 336,7 | 320,0 | 321,3            | 283,8 | 329,1 | 318,4 |
| Abr/12                | 163,0     | 0,0 | 218,9            | 176,6 | 217,1 | 197,4 | 220,2            | 176,2 | 209,4 | 194,3 |
| Mai/12                | 64,2      | 0,0 | 198,6            | 168,4 | 197,2 | 180,9 | 203,8            | 166,1 | 185,0 | 175,3 |
| Jun/12                | 133,2     | 0,0 | 89,2             | 58,1  | 88,1  | 63,4  | 94,8             | 57,1  | 75,1  | 62,3  |
| Jul/12                | 42,2      | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Ago/12                | 0,3       | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Set/12 <sup>(2)</sup> | 0,0       | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Total                 | 1.531,8   | 0,0 | 886,7            | 733,6 | 893,3 | 815,9 | 894,3            | 737,4 | 852,8 | 804,5 |
| 1ª soca               |           |     |                  |       |       |       |                  |       |       |       |
| Set/12 <sup>(3)</sup> | 35,8      | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Out/12                | 89,4      | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Nov/12                | 65,0      | 0,0 | 101,5            | 113,8 | 160,0 | 185,8 | 113,4            | 138,0 | 142,4 | 152,8 |
| Dez/12                | 173,3     | 0,0 | 51,0             | 62,1  | 44,5  | 72,4  | 74,3             | 54,0  | 82,6  | 59,7  |
| Jan/13                | 242,8     | 0,0 | 39,1             | 10,9  | 66,8  | 39,0  | 50,7             | 18,8  | 72,5  | 23,8  |
| Fev/13                | 120,4     | 0,0 | 57,0             | 22,9  | 83,4  | 81,2  | 50,8             | 39,4  | 91,3  | 63,1  |
| Mar/13                | 380,0     | 0,0 | 50,4             | 9,1   | 59,5  | 21,2  | 48,6             | 11,6  | 55,7  | 17,1  |
| Abr/13                | 96,0      | 0,0 | 113,6            | 82,3  | 143,1 | 143,0 | 104,1            | 93,2  | 135,9 | 93,8  |
| Mai/13                | 65,8      | 0,0 | 115,3            | 73,4  | 127,9 | 131,1 | 98,0             | 96,8  | 134,9 | 100,3 |
| Jun/13                | 74,2      | 0,0 | 31,2             | 20,1  | 26,5  | 20,1  | 45,3             | 27,5  | 45,3  | 27,5  |
| Jul/13                | 31,0      | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Ago/13                | 5,1       | 0,0 | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0              | 0,0   | 0,0   | 0,0   |
| Total                 | 1.378,7   | 0,0 | 559,2            | 394,7 | 710,9 | 693,9 | 585,2            | 479,2 | 760,7 | 538,1 |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4; <sup>(1)</sup> mês que não foi realizada irrigação; <sup>(2)</sup> precipitação acumulada entre 01 a 16/09/2012; <sup>(3)</sup> precipitação acumulada entre 17 a 30/09/2012.

conforme marcha de absorção de nutrientes. Entre outubro de 2011 e fevereiro de 2012 não foi possível realizar a irrigação, pois a quantidade de efluente gerada foi insuficiente. Entretanto, as lâminas precipitadas foram elevadas no período o que permitiu o desenvolvimento da cultura sem prejuízos.

Na Tabela 14 é apresentado o armazenamento médio de água no perfil do solo para os tratamentos avaliados nos dois ciclos de cana-de-açúcar. Efetivamente o experimento iniciou no mês de março de 2012, resultando em quatro meses de avaliação na cana planta e em todo ciclo

Tabela 14. Conteúdo de água no perfil do solo (0-1,0 m de profundidade) antes ( $\theta_i$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), em déficit ( $\theta_d$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e fração de água teórica disponível (f, adimensional) para nove tratamentos no ciclo da cana planta e 1ª soca em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Tratamento        | $\theta_i$             | $\theta_f$ | $\theta_d$ | $\theta_e$ | f       |
|-------------------|------------------------|------------|------------|------------|---------|
| <b>Cana plana</b> |                        |            |            |            |         |
| T1                | 0,312 e <sup>(2)</sup> | 0,309 e    | 0,038 a    | 0,000 g    | 0,483 e |
| T2                | 0,348 b                | 0,366 b    | 0,013 d    | 0,029 c    | 1,203 b |
| T3                | 0,334 c                | 0,362 b    | 0,015 c    | 0,027 c    | 1,146 b |
| T4                | 0,320 d                | 0,335 d    | 0,020 b    | 0,006 f    | 0,812 d |
| T5                | 0,321 d                | 0,344 c    | 0,020 b    | 0,015 e    | 0,929 c |
| T6                | 0,362 a                | 0,387 a    | 0,007 e    | 0,045 a    | 1,471 a |
| T7                | 0,343 b                | 0,359 b    | 0,012 d    | 0,021 d    | 1,118 b |
| T8                | 0,329 c                | 0,348 c    | 0,017 c    | 0,015 e    | 0,977 c |
| T9                | 0,338 b                | 0,369 b    | 0,015 c    | 0,034 b    | 1,243 b |
| Teste F           | 30,84*                 | 62,64*     | 26,49*     | 82,07*     | 61,73*  |
| CV <sup>(1)</sup> | 1,87                   | 1,80       | 21,85      | 20,22      | 7,78    |
| Média             | 0,334                  | 0,353      | 0,017      | 0,021      | 1,04    |
| <b>1ª soca</b>    |                        |            |            |            |         |
| T1                | 0,303 b                | 0,302 c    | 0,046 a    | 0,001 b    | 0,387 c |
| T2                | 0,325 a                | 0,329 a    | 0,021 c    | 0,002 b    | 0,734 a |
| T3                | 0,316 a                | 0,332 a    | 0,025 b    | 0,007 a    | 0,769 a |
| T4                | 0,310 b                | 0,318 b    | 0,033 b    | 0,002 b    | 0,591 b |
| T5                | 0,305 b                | 0,322 b    | 0,034 b    | 0,008 a    | 0,651 b |
| T6                | 0,308 b                | 0,325 b    | 0,031 b    | 0,007 a    | 0,683 b |
| T7                | 0,324 a                | 0,332 a    | 0,017 c    | 0,001 b    | 0,770 a |
| T8                | 0,305 b                | 0,319 b    | 0,035 b    | 0,004 b    | 0,608 b |
| T9                | 0,316 a                | 0,332 a    | 0,027 b    | 0,010 a    | 0,774 a |
| Teste F           | 5,16*                  | 12,89*     | 10,62*     | 11,81*     | 12,96*  |
| CV                | 3,50                   | 2,56       | 26,50      | 67,03      | 15,73   |
| Média             | 0,313                  | 0,323      | 0,030      | 0,005      | 0,663   |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade.

na 1ª soca. Entretanto, considerando o volume de irrigação em cada ciclo, nota-se que a cana planta demandou lâmina de irrigação superior à 1ª soca (Tabela 13). Este fato associado à melhor distribuição da  $\theta_f$  e  $\theta_e$  (umidade final e em excesso, respectivamente) no perfil do solo em todos os tratamentos permitem afirmar que os ajustes no manejo da irrigação entre a cana planta e 1ª soca foram eficientes para contornar o excesso da lâmina de ARS ou EET aplicada.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se acréscimo da umidade no perfil do solo após os eventos de irrigação para todos os tratamentos nos dois ciclos analisados, com exceção do tratamento sem irrigação, T1 (Tabela 14). Nota-se que, independente da qualidade da água e do uso ou não da fertirrigação, os tratamentos com tubo gotejador instalado a 0,2 m de profundidade (T2, T3, T6 e T7) apresentaram distribuição homogênea de água no perfil do solo quando comparado aos tratamentos com tubo gotejador a 0,4 m (T4, T5, T8 e T9), pois, de um modo geral, proporcionaram os menores valores de déficit de água. Ainda, de acordo com a Tabela 14, observou-se um efeito positivo da alteração da equação de calibração para estimativa da umidade do solo do primeiro para o segundo ciclo de cultivo, conforme descrito no item 5.5. Tal fato pode ser observado comparando-se os valores médios da umidade em excesso no solo entre os dois ciclos, além de se verificar redução da lâmina de água aplicada. Mesmo que tenha ocorrido aumento do déficit de umidade do solo, observou-se, em geral, que os valores do fator  $f$  estavam adequados ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, não acarretando estresse hídrico acentuado, conforme recomendações de Allen et al. (1998).

Embora tenha se observado melhorias no manejo das irrigações no segundo ciclo de cultivo em relação ao primeiro, principalmente com redução de perdas percolação profunda, é importante ressaltar que a fração de água disponível  $f$  não atingiu 100% (Tabela 14), o que corresponderia, após as irrigações, a reposição de água ao solo até a capacidade de campo. Neste aspecto, ao considerar que as leituras de umidade foram realizadas uma hora após o término das irrigações, que a redistribuição de água no solo é um processo que continua desde que haja diferença de potencial total da água no solo (COELHO e OR, 1999) e, ainda, que a distribuição da água no solo quando aplicada por gotejamento promove formação de frente de molhamento e, com isso, valores diferenciados de umidade no bulbo úmido nas diferentes direções de fluxo (SOUZA et al., 2007), não é possível que todo o volume do bulbo atinja a umidade na capacidade de campo simultaneamente, mesmo considerando diferentes profundidades no perfil do solo para estimativa do armazenamento de água.

O perfil de distribuição de água com os respectivos valores de umidade do solo e fração de água teórica disponível em dois anos de avaliação da irrigação subsuperficial são apresentados na Figura 16. Notou-se ocorrência de umidade em déficit no perfil do solo nas diferentes profundidades e nos dois ciclos de cultivo com a condução da cultura sem irrigação (T1), observando déficit acentuado na camada superficial do solo. Ainda considerando esta camada, observou-se que a fração de água disponível no solo foi abaixo do considerado adequado para a cana (ALLEN et al., 1998). Notou-se que os tratamentos com tubo gotejador instalado a 0,2 m de profundidade apresentaram conteúdo de água concentrado até 0,8 m no perfil do solo.

Em contrapartida, os tubos gotejadores instalados a 0,4 m de profundidade apresentam distribuição de água a partir do ponto de emissão do gotejador, com aumento da umidade (acima da capacidade de campo) em camadas mais profundas do solo. Dessa forma, a instalação a 0,2 m apresenta-se menos sujeita à ocorrência de percolação profunda, visto que a água concentra-se próximo a área de maior concentração radicular (Figura 16). Por outro lado, quando os emissores são instalados a 0,4 m de profundidade o risco de perdas por percolação profunda aumenta, já que a água se concentra abaixo da zona radicular efetiva (Figura 16). Diversos trabalhos em cana-de-açúcar demonstraram que a profundidade efetiva do sistema radicular varia entre 0,4 até 0,6 m (ALVAREZ et al., 2000; FARONI e TRIVELIN, 2006; SEGATO et al., 2006; FARIAS et al., 2008; SOUSA et al., 2013).

Vale destacar que o excesso de umidade observado na camada de 0,8-1,0 m para os tratamentos T5, T8 e T9 (emissores a 0,4 m de profundidade) e no tratamento T2 (emissores a 0,2 m de profundidade), podem ter resultado em perdas por percolação, já que ultrapassaram o limite onde se concentra o sistema radicular (Figura 16). Machado e Oliveira (2005) não notaram diferença na umidade do solo para diferentes profundidades de instalação do emissor, o que pode estar relacionado à alta frequência de aplicação de água (dias alternados), proporcionando umidade acima da capacidade de campo e, conseqüentemente, perda por percolação. Souza et al. (2007) testaram gotejadores a 0,25 m de profundidade e, também, observaram a possibilidade de ocorrer percolação, já que era alta a umidade em maiores profundidades. Oron et al. (1999) afirmam que a instalação do gotejador a 0,6 m de profundidade diminuiu a umidade média no perfil do solo em função da perda de água por percolação. Portanto, alterações na frequência e lâmina de irrigação são alternativas para um eficiente manejo da água em sistemas de irrigação subsuperficial com gotejadores instalados em camadas profundas no solo.

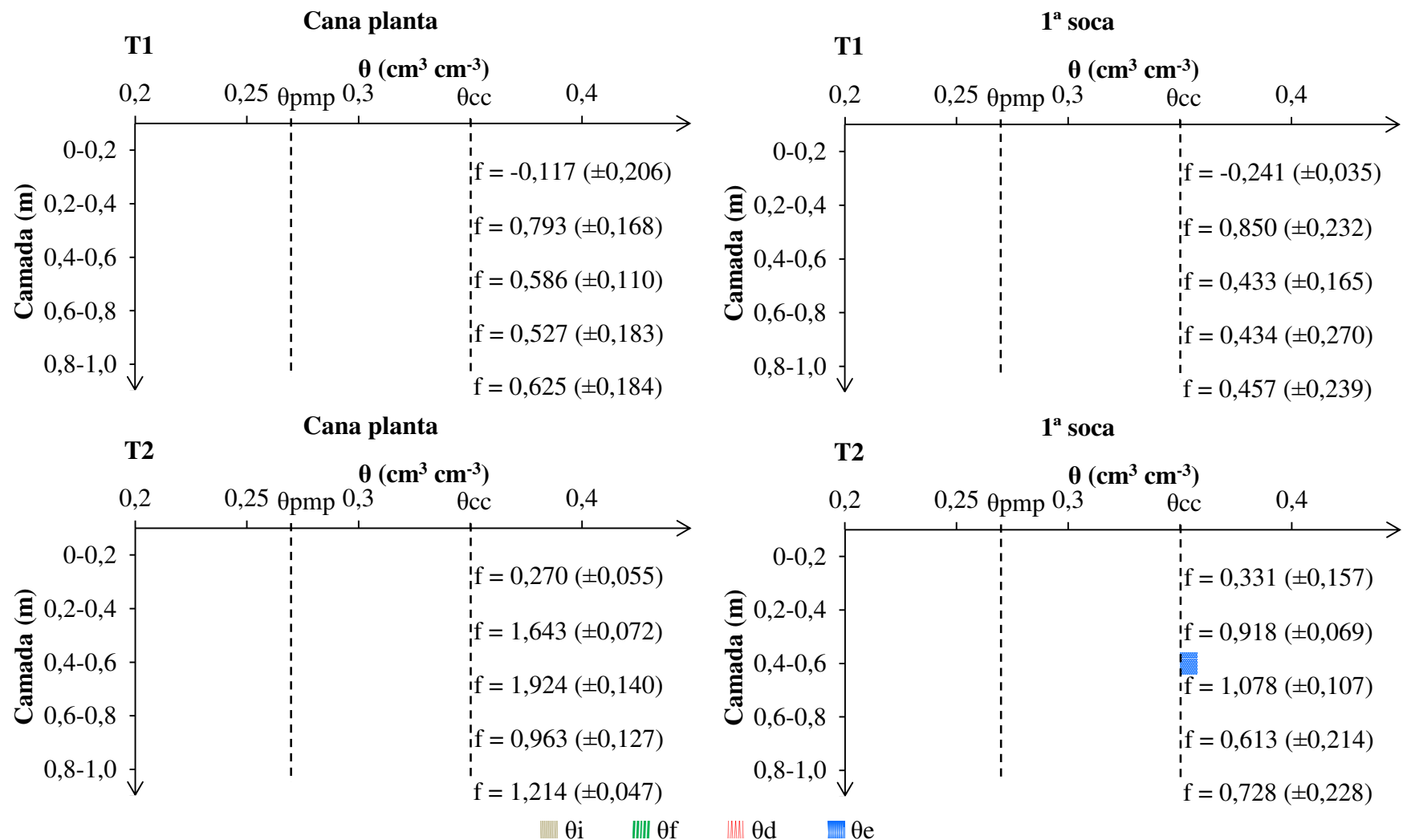


Figura 16. Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível ( $f$ , adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

(Continua)

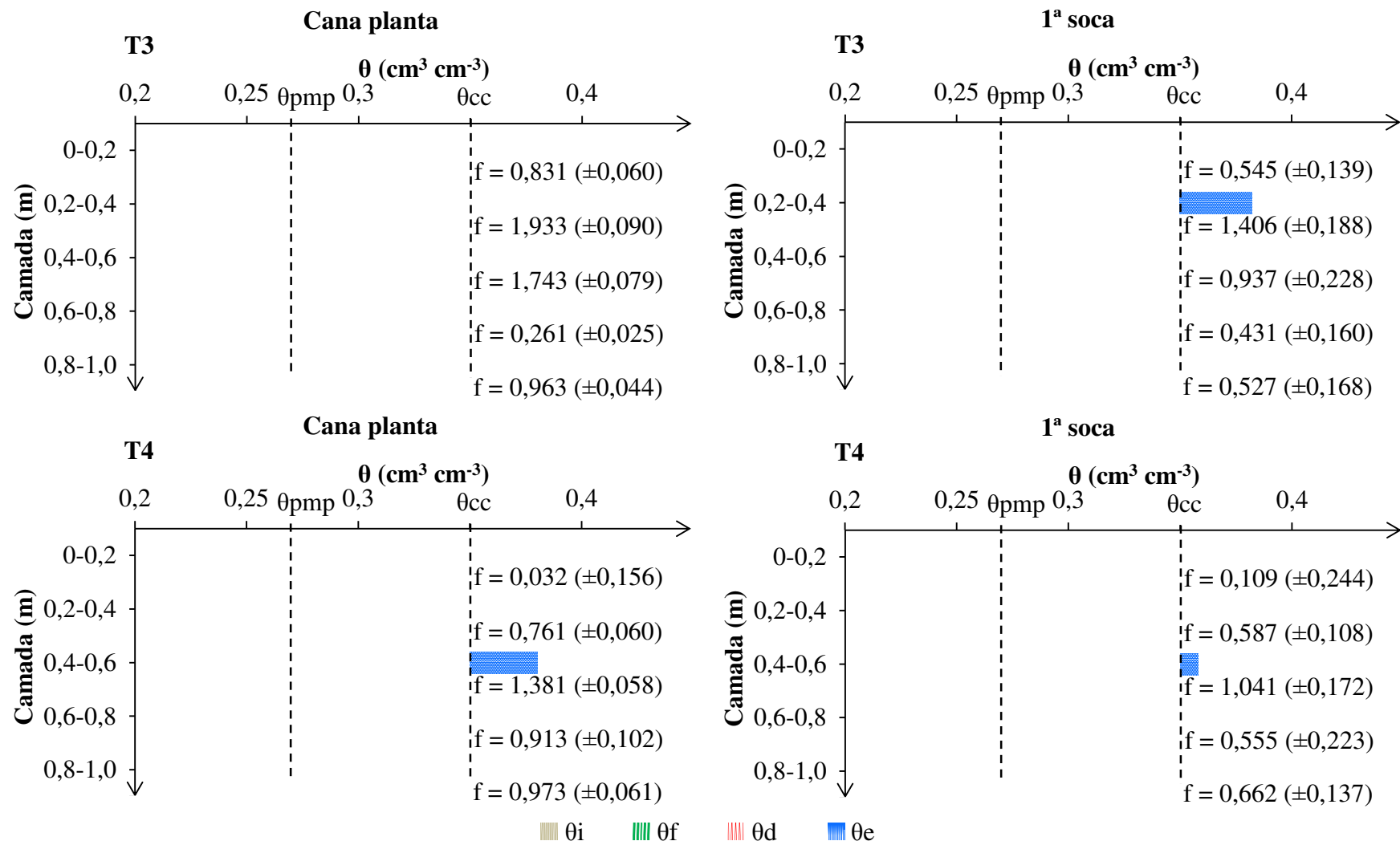


Figura 16. Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível (f, adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

(Continuação)

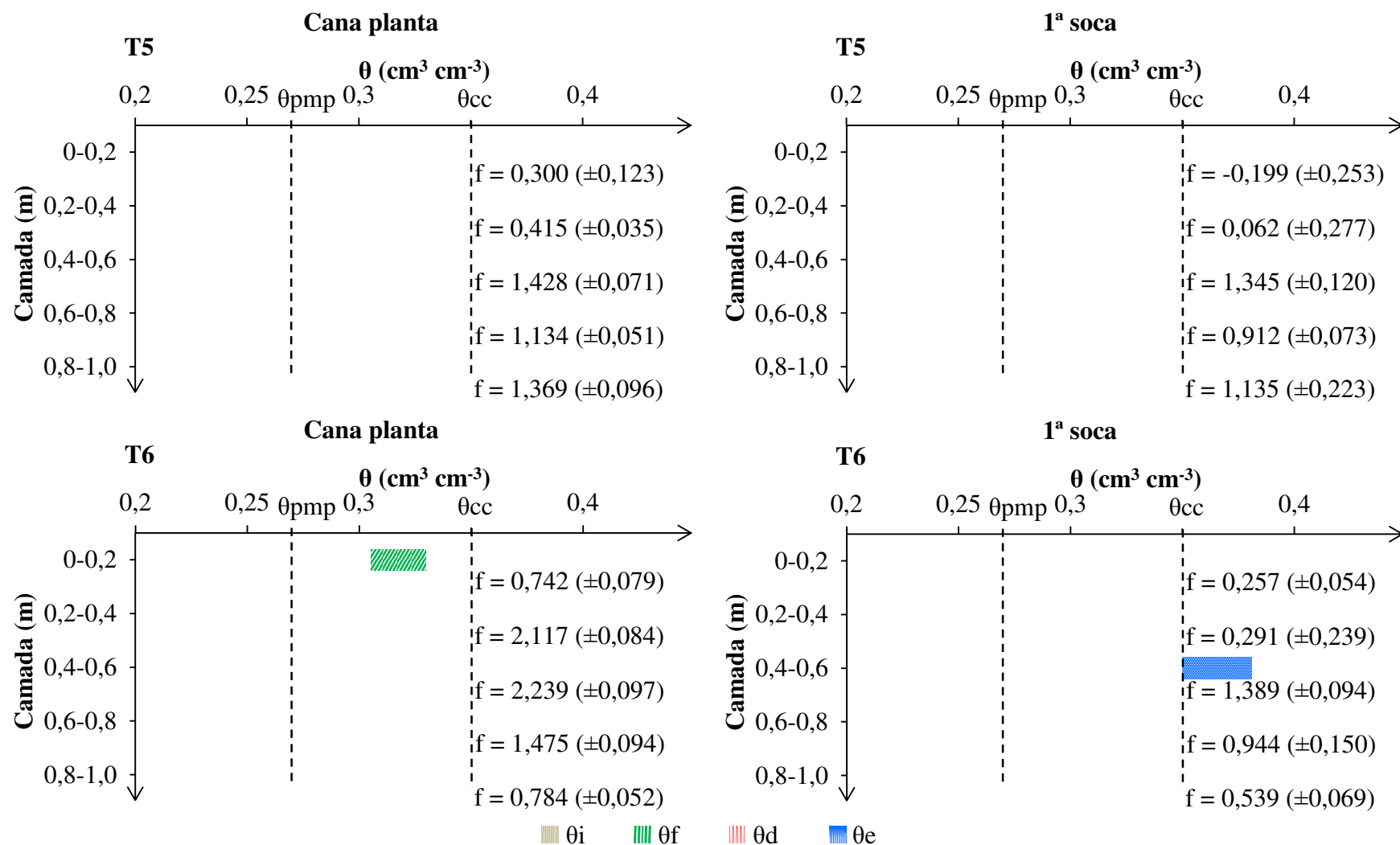


Figura 16. Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível ( $f$ , adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

(Continuação)



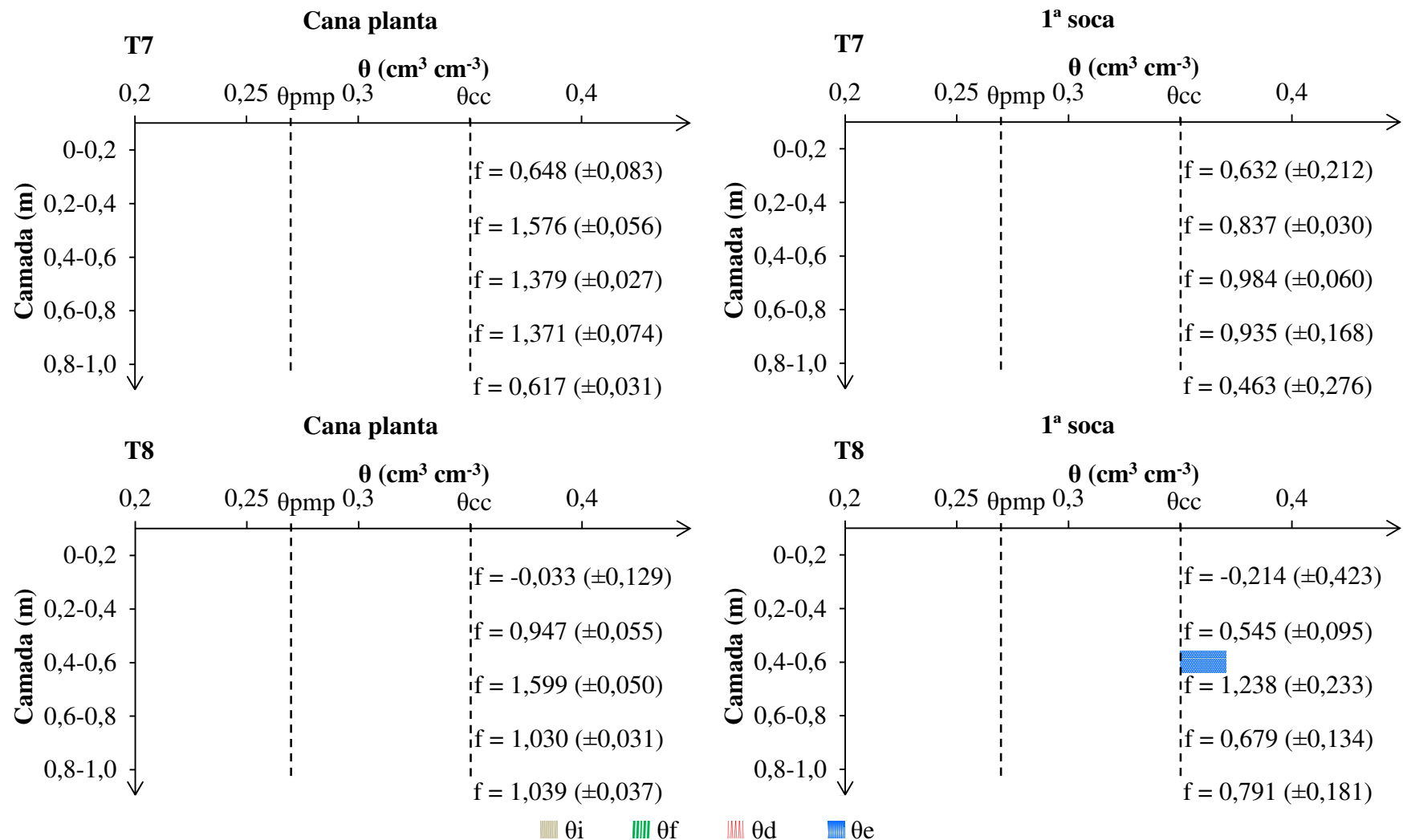


Figura 16. Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível ( $f$ , adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

(Continuação)

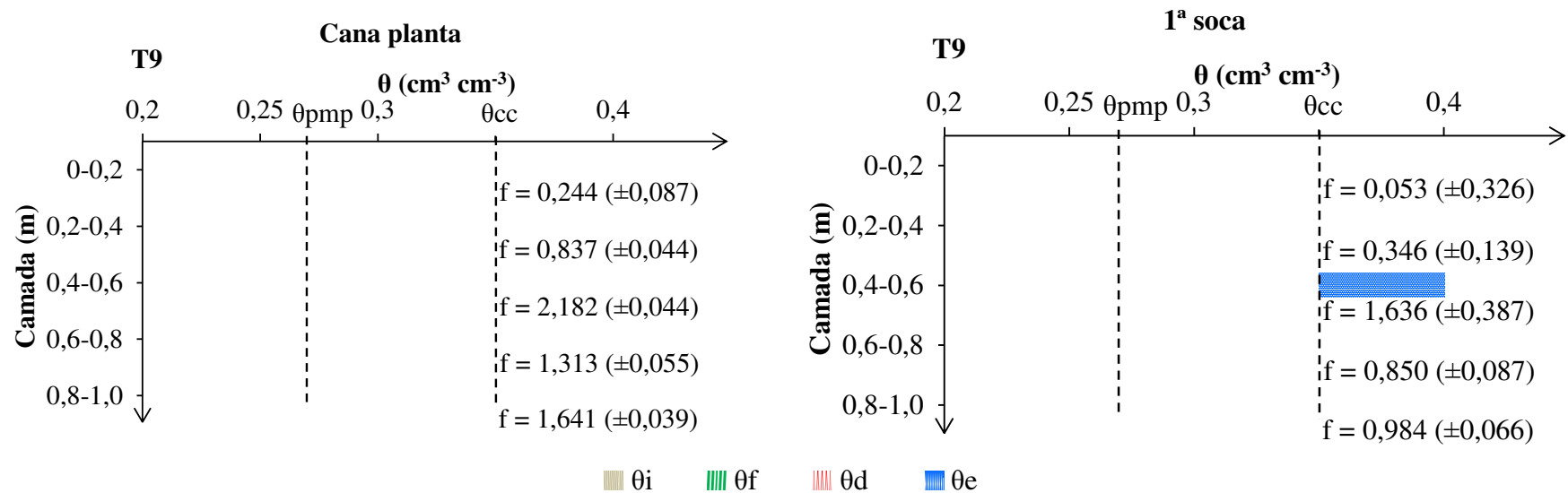


Figura 16. Perfil de umidade do solo antes ( $\theta_i$ ) e após a irrigação ( $\theta_f$ ), em déficit ( $\theta_d$ ) e em excesso ( $\theta_e$ ), umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{pmp}$ ) e na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e fração de água teórica disponível ( $f$ , adimensional) com desvio padrão para nove tratamentos em dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

(Conclusão)

Conforme discutido anteriormente, as alterações realizadas no manejo de irrigação foram determinantes para redução do excesso de água aplicado (Tabela 13; Figura 16) e do potencial de percolação em profundidade. Além disso, o manejo de irrigação por balanço de água no solo é uma técnica que pode ser utilizada para o uso racional dos recursos hídricos, pois a lâmina a ser aplicada condiz com a capacidade de retenção de água do solo, diferenciando-se de manejos que não consideram a quantidade de água no solo no momento da irrigação, como, por exemplo, o manejo pela evapotranspiração da cultura (que considera o clima e a cultura), conforme Allen et al. (1998). Isto corrobora com o citado por Prevedello et al. (2007), pois as variações que ocorrem na atmosfera (elementos meteorológicos) não proporcionam efeito imediato nos processos dinâmicos da água no solo ou na planta. Aliado a isto, pode-se afirmar que o monitoramento da água no solo reflete a condição do cultivo de interesse, considerando o clima, o solo e as práticas culturais envolvidas.

Considerando que a planta pode utilizar até 65% da água disponível no solo sem resultar em quebra de produtividade por estresse hídrico (ALLEN et al., 1998), verificou-se na presente pesquisa que praticamente todos os tratamentos apresentaram restrição hídrica na primeira camada de solo avaliada (0-0,2 m), exceto T3 e T7 (Figura 16). Os tratamentos T1, T2, T4, T8 e T9 apresentaram baixo conteúdo de água disponível na camada de 0-0,2 m na cana planta e na 1ª soca; o tratamento T5 entre 0-0,2 m na cana planta; e os tratamentos T5 e T6 entre 0-0,4 m na 1ª soca. De forma geral, os tratamentos com tubo gotejador instalado a 0,2 m sempre disponibilizavam quantidade de água suficiente para o desenvolvimento das plantas, exceto no T2 (que apresentou uma melhora entre a cana planta e 1ª soca, visto que foi observado  $f > 35\%$  [ $f_{\text{máximo}} = \text{média} + \text{desvio padrão} = 0,488$ ]) e no T6 (que demonstrou menor disponibilidade de água entre a cana planta e a 1ª soca). Em contrapartida, os emissores instalados a 0,4 m de profundidade sempre proporcionavam déficit hídrico às plantas nos primeiros 0,2 m do perfil do solo, podendo apresentar restrição hídrica até os 0,4 m do perfil (T5).

A partir das análises do conteúdo de água no solo foi possível verificar que nenhuma das profundidades de instalação do tubo gotejador avaliadas apresentou molhamento ( $> \theta_{cc}$ ) na superfície do solo (0,0-0,2 m), mesmo quando altas lâminas de irrigação foram aplicadas na cana planta, mostrando adequada capacidade de redistribuição e permeabilidade de água. Além disso, a absorção contínua de água pelo sistema radicular também contribuiu para evitar o afloramento de água na superfície do solo após sucessivas irrigações. Farias et al. (2008) afirmam que a maior

concentração de raízes próximo à superfície do solo beneficia a absorção de água após irrigação ou precipitação, minimizando a evaporação.

Apesar de a presente pesquisa ter sido realizada em local com elevados índices de precipitação, foram observadas diferenças no conteúdo de água no perfil do solo para os diferentes tratamentos empregados ao longo do ciclo da cultura. Kamara et al. (1991) sugerem que o efeito de diferentes profundidades de instalação do gotejador é mascarado pela ocorrência de precipitações. Assim, observações *in loco* quanto ao crescimento vegetativo, sistema radicular, produtividade, propriedades físicas do solo e, ainda, práticas agrícolas previstas são elementos importantes na determinação da profundidade adequada de instalação do tubo gotejador.

Ainda, de acordo com os resultados do monitoramento da umidade do solo e do manejo de irrigação adotado, pode-se observar que o tubo gotejador instalado a 0,2 m de profundidade foi o mais adequado do ponto de vista ambiental e do aproveitamento de água, pois promoveu redução de perdas de água por evaporação, possível contaminação dos trabalhadores e plantas e menor risco de perdas por percolação. Fatores importantes relacionados à gestão racional da água e ainda mais relevante quando é utilizada água de reúso proveniente de esgoto sanitário (EET) na agricultura.

## **6.2 Salinidade e sodicidade no perfil do solo**

Amostras de solo foram coletadas no início (setembro de 2012) e no final da 1ª soca (agosto de 2013) para avaliação da salinidade e sodicidade. Observou-se, após realizar a análise de variância, que não houve interação significativa entre os dois fatores avaliados (profundidade do tubo gotejador e qualidade de água) para pH, CE, PST e RAS em cinco profundidades avaliadas no início da 1ª soca (item 9.2, Tabela 30). Já no final da 1ª soca foram observadas duas interações na camada de 0-0,2 m de solo, demonstrando que o pH apresentou-se menos ácido após aplicação de ARS (água de reservatório superficial) com emissores instalados a 0,4 m de profundidade e o PST (porcentagem de sódio trocável) foi maior quando se aplicou EET (efluente de esgoto tratado) com emissores instalados a 0,2 m de profundidade (Tabela 15). Além disso, nas poucas vezes onde foram observadas diferenças entre os níveis dentro de cada fonte de variação, o EET sempre apresentou as maiores médias, exceto para o parâmetro pH na camada de 0,2-0,4 m no final da 1ª soca (item 9.2, Tabela 30). Esses resultados demonstram uma tendência de aumento da sodicidade do solo como o uso de EET.

Tabela 15. Porcentagem de sódio trocável (PST, %) e pH do solo em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, e água de reservatório superficial – ARS) e da profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) no final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Qualidade  | Profundidade           |         |                 |          |
|------------|------------------------|---------|-----------------|----------|
|            | 0,2                    | 0,4     | 0,2             | 0,4      |
|            | ----- pH -----         |         | ----- PST ----- |          |
| <b>EET</b> | 5,47 aA <sup>(1)</sup> | 5,40 bA | 0,097 aA        | 0,047 aB |
| <b>ARS</b> | 5,43 aB                | 5,67 aA | 0,057 aA        | 0,073 aA |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em seguida, foram comparados os tratamentos irrigados com a testemunha (Tabela 16), os quais não diferiram estatisticamente tanto no início quanto no final da 1ª soca, exceto para pH e CE (condutividade elétrica) na camada de 0,2-0,4 e 0,8-1,0 m, respectivamente, ambos no final da 1ª soca. Na Tabela 16 é apresentada a classificação do solo quanto aos critérios para solos sódicos e salinos (RICHARDS, 1954), demonstrando que o solo permanece classificado como normal mesmo após sucessivas irrigações com EET ou ARS durante dois ciclos de cana-de-açúcar.

Ao observar os dados de CE no início e final da 1ª soca (Tabela 16) percebe-se redução das concentrações de sal presentes no solo, independente da qualidade de água utilizada (EET ou ARS). Essas observações estão em conformidade com Leal et al. (2009b), que notaram redução da CE em função da não continuidade da irrigação para maturação final da cana e, com isso, acúmulo de açúcar. Assim, nota-se que o solo apresentou capacidade de suportar a aplicação dos sais presentes no EET ( $CE \approx 1,0 \text{ dS m}^{-1}$ ), não elevando seu grau de salinidade, o qual permaneceu classificado como normal.

De forma geral, ao considerar os limites de tolerância estabelecidos por Ayers e Westcot (1994), a cana-de-açúcar não foi afetada pelos limites CE observado no extrato de saturação do solo ( $< 1,7 \text{ dS m}^{-1}$ ) e na água de irrigação ( $< 1,1 \text{ dS m}^{-1}$ ), podendo representar 100% da produção potencial.

Tabela 16. Parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo critérios estabelecidos por Richards (1954) para início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP.

(Continua)

| Tratamento                     | Início do ciclo    |                    |                    |                    |                         | Final do ciclo                 |                    |                    |                    |          |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|
|                                | pH                 | CE <sup>(1)</sup>  | PST <sup>(2)</sup> | RAS <sup>(3)</sup> | Classif. <sup>(4)</sup> | pH                             | CE                 | PST                | RAS                | Classif. |
| ----- Camada 0,0 - 0,2 m ----- |                    |                    |                    |                    |                         | ----- Camada 0,0 - 0,2 m ----- |                    |                    |                    |          |
| T1                             | 5,6                | 0,410              | 0,087              | 0,017              | Normal                  | 5,6                            | 0,158              | 0,063              | 0,016              | Normal   |
| T2                             | 5,5                | 0,354              | 0,082              | 0,016              | Normal                  | 5,5                            | 0,129              | 0,099              | 0,019              | Normal   |
| T4                             | 5,6                | 0,313              | 0,062              | 0,012              | Normal                  | 5,4                            | 0,134              | 0,047              | 0,010              | Normal   |
| T6                             | 5,7                | 0,264              | 0,081              | 0,015              | Normal                  | 5,4                            | 0,131              | 0,058              | 0,011              | Normal   |
| T8                             | 5,7                | 0,305              | 0,069              | 0,013              | Normal                  | 5,7                            | 0,135              | 0,071              | 0,013              | Normal   |
| Teste F                        | 0,58 <sup>ns</sup> | 0,58 <sup>ns</sup> | 2,68 <sup>ns</sup> | 0,82 <sup>ns</sup> | -                       | 2,02 <sup>ns</sup>             | 0,47 <sup>ns</sup> | 2,54 <sup>ns</sup> | 2,50 <sup>ns</sup> | -        |
| CV% <sup>(5)</sup>             | 3,77               | 37,62              | 12,48              | 38,02              | -                       | 2,41                           | 22,09              | 30,80              | 33,54              | -        |
| Média geral                    | 5,6                | 0,331              | 0,076              | 0,014              | -                       | 5,5                            | 0,139              | 0,067              | 0,013              | -        |
| ----- Camada 0,2 - 0,4 m ----- |                    |                    |                    |                    |                         | ----- Camada 0,2 - 0,4 m ----- |                    |                    |                    |          |
| T1                             | 5,6                | 0,349              | 0,089              | 0,017              | Normal                  | 5,6 ab <sup>(6)</sup>          | 0,094              | 0,061              | 0,014              | Normal   |
| T2                             | 5,6                | 0,309              | 0,097              | 0,018              | Normal                  | 5,5 b                          | 0,090              | 0,090              | 0,029              | Normal   |
| T4                             | 5,6                | 0,251              | 0,078              | 0,015              | Normal                  | 5,5 b                          | 0,086              | 0,050              | 0,010              | Normal   |
| T6                             | 5,7                | 0,223              | 0,072              | 0,013              | Normal                  | 5,6 ab                         | 0,089              | 0,068              | 0,012              | Normal   |
| T8                             | 5,7                | 0,229              | 0,075              | 0,013              | Normal                  | 5,8 a                          | 0,096              | 0,075              | 0,012              | Normal   |
| Teste F                        | 0,18 <sup>ns</sup> | 1,13 <sup>ns</sup> | 1,06 <sup>ns</sup> | 0,82 <sup>ns</sup> | -                       | 4,50*                          | 0,25 <sup>ns</sup> | 1,66 <sup>ns</sup> | 1,62 <sup>ns</sup> | -        |
| CV%                            | 3,94               | 32,14              | 21,93              | 33,27              | -                       | 1,6                            | 18,32              | 29,79              | 70,23              | -        |
| Média geral                    | 5,6                | 0,274              | 0,082              | 0,016              | -                       | 5,6                            | 0,093              | 0,069              | 0,014              | -        |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Condutividade elétrica, dS m<sup>-1</sup>; <sup>(2)</sup> Porcentagem de sódio trocável, %; <sup>(3)</sup> Razão de absorção de sódio, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; <sup>(4)</sup> Classificação do solo segundo critérios de Richards (1954); <sup>(5)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(6)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 16. Parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo critérios estabelecidos por Richards (1954) para início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP.

(Continuação)

| Tratamento                     | Início do ciclo    |                    |                    |                    |                         | Final do ciclo                 |                    |                    |                    |          |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|
|                                | pH                 | CE <sup>(1)</sup>  | PST <sup>(2)</sup> | RAS <sup>(3)</sup> | Classif. <sup>(4)</sup> | pH                             | CE                 | PST                | RAS                | Classif. |
| ----- Camada 0,4 - 0,6 m ----- |                    |                    |                    |                    |                         | ----- Camada 0,4 - 0,6 m ----- |                    |                    |                    |          |
| T1                             | 5,7                | 0,305              | 0,099              | 0,018              | Normal                  | 5,6                            | 0,066              | 0,114              | 0,020              | Normal   |
| T2                             | 5,7                | 0,212              | 0,113              | 0,020              | Normal                  | 5,6                            | 0,062              | 0,162              | 0,029              | Normal   |
| T4                             | 5,7                | 0,204              | 0,079              | 0,013              | Normal                  | 5,5                            | 0,070              | 0,084              | 0,016              | Normal   |
| T6                             | 5,8                | 0,175              | 0,076              | 0,013              | Normal                  | 5,6                            | 0,064              | 0,098              | 0,016              | Normal   |
| T8                             | 5,8                | 0,155              | 0,085              | 0,014              | Normal                  | 5,8                            | 0,065              | 0,071              | 0,015              | Normal   |
| Teste F                        | 0,24 <sup>ns</sup> | 1,46 <sup>ns</sup> | 1,73 <sup>ns</sup> | 0,84 <sup>ns</sup> | -                       | 1,07 <sup>ns</sup>             | 0,30 <sup>ns</sup> | 1,43 <sup>ns</sup> | 1,29 <sup>ns</sup> | -        |
| CV% <sup>(5)</sup>             | 3,89               | 39,00              | 23,35              | 36,70              | -                       | 2,97                           | 13,14              | 48,18              | 50,83              | -        |
| Média geral                    | 5,7                | 0,212              | 0,091              | 0,015              | -                       | 5,6                            | 0,067              | 0,105              | 0,020              | -        |
| ----- Camada 0,6 - 0,8 m ----- |                    |                    |                    |                    |                         | ----- Camada 0,6 - 0,8 m ----- |                    |                    |                    |          |
| T1                             | 5,7                | 0,270              | 0,102              | 0,017              | Normal                  | 5,7                            | 0,057              | 0,077              | 0,018              | Normal   |
| T2                             | 5,6                | 0,178              | 0,111              | 0,020              | Normal                  | 5,6                            | 0,061              | 0,163              | 0,028              | Normal   |
| T4                             | 5,7                | 0,162              | 0,093              | 0,016              | Normal                  | 5,4                            | 0,062              | 0,129              | 0,025              | Normal   |
| T6                             | 5,8                | 0,181              | 0,089              | 0,015              | Normal                  | 5,6                            | 0,057              | 0,114              | 0,020              | Normal   |
| T8                             | 5,8                | 0,135              | 0,103              | 0,017              | Normal                  | 5,9                            | 0,050              | 0,082              | 0,012              | Normal   |
| Teste F                        | 0,31 <sup>ns</sup> | 3,05 <sup>ns</sup> | 0,36 <sup>ns</sup> | 0,54 <sup>ns</sup> | -                       | 1,08 <sup>ns</sup>             | 0,58 <sup>ns</sup> | 1,27 <sup>ns</sup> | 1,40 <sup>ns</sup> | -        |
| CV%                            | 4,16               | 27,96              | 25,46              | 41,14              | -                       | 4,85                           | 19,78              | 47,87              | 45,48              | -        |
| Média geral                    | 5,7                | 0,186              | 0,100              | 0,016              | -                       | 5,7                            | 0,058              | 0,114              | 0,021              | -        |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Condutividade elétrica, dS m<sup>-1</sup>; <sup>(2)</sup> Porcentagem de sódio trocável, %; <sup>(3)</sup> Razão de absorção de sódio, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; <sup>(4)</sup> Classificação do solo segundo critérios de Richards (1954); <sup>(5)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(6)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 16. Parâmetros sódico-salinos e classificação do solo segundo critérios estabelecidos por Richards (1954) para início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar, Campinas-SP.

(Conclusão)

| Tratamento        | Início do ciclo                |                    |                    |                    |                         | Final do ciclo                 |                         |                    |                    |          |
|-------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|----------|
|                   | pH                             | CE <sup>(1)</sup>  | PST <sup>(2)</sup> | RAS <sup>(3)</sup> | Classif. <sup>(4)</sup> | pH                             | CE                      | PST                | RAS                | Classif. |
|                   | ----- Camada 0,8 - 1,0 m ----- |                    |                    |                    |                         | ----- Camada 0,8 - 1,0 m ----- |                         |                    |                    |          |
| T1                | 5,7                            | 0,305              | 0,099              | 0,018              | Normal                  | 5,8                            | 0,060 ab <sup>(6)</sup> | 0,130              | 0,021              | Normal   |
| T2                | 5,7                            | 0,212              | 0,113              | 0,020              | Normal                  | 5,7                            | 0,101 a                 | 0,074              | 0,023              | Normal   |
| T4                | 5,7                            | 0,204              | 0,079              | 0,013              | Normal                  | 5,6                            | 0,063 ab                | 0,164              | 0,030              | Normal   |
| T6                | 5,8                            | 0,175              | 0,076              | 0,013              | Normal                  | 5,5                            | 0,063 ab                | 0,100              | 0,019              | Normal   |
| T8                | 5,8                            | 0,155              | 0,085              | 0,014              | Normal                  | 5,8                            | 0,045 b                 | 0,084              | 0,013              | Normal   |
| Teste F           | 0,24 <sup>ns</sup>             | 1,46 <sup>ns</sup> | 1,73 <sup>ns</sup> | 0,84 <sup>ns</sup> | -                       | 0,50 <sup>ns</sup>             | 5,14*                   | 2,29 <sup>ns</sup> | 2,77 <sup>ns</sup> | -        |
| CV <sup>(5)</sup> | 3,89                           | 39,00              | 23,35              | 36,70              | -                       | 5,82                           | 22,44                   | 38,59              | 33,21              | -        |
| Média geral       | 5,7                            | 0,212              | 0,091              | 0,015              | -                       | 5,7                            | 0,067                   | 0,110              | 0,023              | -        |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Condutividade elétrica, dS m<sup>-1</sup>; <sup>(2)</sup> Porcentagem de sódio trocável, %; <sup>(3)</sup> Razão de absorção de sódio, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; <sup>(4)</sup> Classificação do solo segundo critérios de Richards (1954); <sup>(5)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(6)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Apesar de não ter sido observada diferença significativa para os parâmetros sódicos (PST e RAS) entre os tratamentos irrigados (T2, T4, T6 e T8) e o sequeiro (T1) (Tabela 16), notou-se aumento da média geral em profundidades maiores que 0,4 m (tanto para PST, quanto para RAS). Por outro lado, o T2 (tratamento com tubo gotejador instalado a 0,2 m de profundidade e uso de EET) apresentou pequeno aumento destes índices na camada de 0-0,8 m, resultando em distribuição de água no perfil do solo e, com isso, maior expansão do íon sódio nos limites da frente de molhamento (periferia do bulbo úmido), inclusive na camada mais superficial do solo (0-0,2 m). Shalhevet (1994) observou que o acúmulo de sais proporcionado pela irrigação localizada se dá na frente de molhamento, podendo ser acumulada, segundo Hanson e May (2011), acima da linha gotejadora (quando a irrigação localizada do tipo subsuperficial é utilizada).

O fato da aplicação de EET ou ARS não ter influenciado a classificação do solo quanto aos parâmetros sódico-salinos já era esperado, pois ambas as qualidades de água utilizadas apresentavam baixa capacidade de impactar o ambiente, não influenciando as propriedades físico-químicas do solo e o desenvolvimento da planta. Além disso, outros motivos podem ser acrescentados:

1. Altas lâminas de precipitação que atuaram como lâminas de irrigação para lixiviação do excesso de sais (“lavagem do solo”), auxiliando a distribuição no perfil do solo. Segundo Monteiro et al. (2009), a necessidade de lâminas de irrigação para lixiviação do excesso de sais no solo pode ser reduzida na ocorrência de altos volumes de chuva, pois se mostraram eficientes na lavagem natural do perfil do solo;
2. Considerando o ponto de amostragem utilizado nestas avaliações (ponto P0,4 – distante 0,4 m do tubo gotejador) e que havia uma linha de plantas no ponto P0,2 (ponto situado entre o gotejador e o local de amostragem), pode-se inferir que os sais presentes no solo foram absorvidos pela planta, principalmente no final do ciclo/maturação; e
3. Historicamente, a área experimental sempre foi utilizada de forma racional, praticando-se adubação conforme as necessidades e não sendo utilizados resíduos que pudessem proporcionar a ocorrência de salinização ou sodicidade, conforme pode ser comprovado pela caracterização inicial do solo experimental (item 5.2, Tabela 9 e 10).

### 6.3 Atributos físicos, PST e CE no perfil do solo

Amostras de solo foram coletadas em pontos uniformes no perfil do solo (em trincheiras) no final da 1ª soca (agosto de 2013). Após comparar os tratamentos fertirrigados (T2, T4, T6 e T8) com a testemunha (T1) observou-se diferença estatística significativa para as variáveis PST (porcentagem de sódio trocável), CE (condutividade elétrica) e Ds (densidade do solo) em pelo menos uma das profundidades avaliadas, não sendo observada diferença para os demais parâmetros físicos do solo analisados (Tabela 17 e 18).

Tabela 17. Porcentagem de sódio trocável (PST, %), condutividade elétrica (CE, dS m<sup>-1</sup>), densidade do solo (Ds, g cm<sup>-3</sup>) e diâmetro médio de poros (DMP, mm) em cinco diferentes camadas de solo (0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Camada (m)                                 | T1                     | T2      | T4       | T6       | T8       | Teste F            | CV <sup>(1)</sup> | Média |
|--------------------------------------------|------------------------|---------|----------|----------|----------|--------------------|-------------------|-------|
| <b>Porcentagem de sódio trocável (PST)</b> |                        |         |          |          |          |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                    | 0,070ab <sup>(2)</sup> | 0,107 a | 0,053 b  | 0,070 ab | 0,080 ab | 3,81*              | 23,51             | 0,076 |
| 0,2-0,4                                    | 0,082 b                | 0,364 a | 0,093 b  | 0,091 b  | 0,083 b  | 4,47*              | 69,20             | 0,143 |
| 0,4-0,6                                    | 0,092 b                | 0,473 a | 0,312 ab | 0,108 b  | 0,113 b  | 6,64*              | 51,32             | 0,220 |
| 0,6-0,8                                    | 0,084 b                | 0,488 a | 0,468 a  | 0,111 b  | 0,123 b  | 13,93*             | 37,20             | 0,255 |
| 0,8-1,0                                    | 0,111 b                | 0,536 a | 0,472 ab | 0,103 b  | 0,123 b  | 7,29*              | 51,45             | 0,269 |
| <b>Condutividade elétrica (CE)</b>         |                        |         |          |          |          |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                    | 0,152                  | 0,141   | 0,134    | 0,132    | 0,134    | 0,28 <sup>ns</sup> | 19,41             | 0,139 |
| 0,2-0,4                                    | 0,098                  | 0,121   | 0,091    | 0,096    | 0,090    | 0,93 <sup>ns</sup> | 23,05             | 0,099 |
| 0,4-0,6                                    | 0,070                  | 0,100   | 0,083    | 0,069    | 0,066    | 2,78 <sup>ns</sup> | 18,86             | 0,077 |
| 0,6-0,8                                    | 0,063 a                | 0,088 a | 0,083 a  | 0,058 a  | 0,060 a  | 4,52*              | 16,21             | 0,070 |
| 0,8-1,0                                    | 0,062 b                | 0,118 a | 0,088 ab | 0,058 b  | 0,052 b  | 11,11*             | 18,84             | 0,076 |
| <b>Densidade do solo (Ds)</b>              |                        |         |          |          |          |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                    | 1,29                   | 1,23    | 1,27     | 1,26     | 1,30     | 0,65 <sup>ns</sup> | 4,26              | 1,27  |
| 0,2-0,4                                    | 1,31 ab                | 1,42 a  | 1,30 ab  | 1,26 b   | 1,30 ab  | 4,12*              | 4,06              | 1,32  |
| 0,4-0,6                                    | 1,19 b                 | 1,31 a  | 1,19 b   | 1,27 ab  | 1,18 b   | 7,89*              | 3,07              | 1,23  |
| 0,6-0,8                                    | 1,16                   | 1,21    | 1,11     | 1,16     | 1,16     | 2,84 <sup>ns</sup> | 3,05              | 1,16  |
| 0,8-1,0                                    | 1,14                   | 1,16    | 1,10     | 1,13     | 1,15     | 1,47 <sup>ns</sup> | 2,72              | 1,14  |
| <b>Diâmetro médio de poros (DMP)</b>       |                        |         |          |          |          |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                    | 1,92                   | 1,70    | 1,53     | 1,57     | 1,67     | 0,70 <sup>ns</sup> | 18,69             | 1,68  |
| 0,2-0,4                                    | 1,80                   | 1,47    | 1,34     | 1,78     | 1,82     | 0,96 <sup>ns</sup> | 23,78             | 1,64  |
| 0,4-0,6                                    | 1,35                   | 1,66    | 1,09     | 1,52     | 1,53     | 0,55 <sup>ns</sup> | 35,97             | 1,43  |
| 0,6-0,8                                    | 1,28                   | 1,37    | 1,07     | 1,11     | 1,05     | 0,38 <sup>ns</sup> | 33,75             | 1,18  |
| 0,8-1,0                                    | 1,13                   | 1,14    | 1,02     | 1,12     | 1,18     | 0,09 <sup>ns</sup> | 30,90             | 1,12  |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 18. Índice de estabilidade de agregados (IEA, %), grau de dispersão (GD, %), porosidade total (PT, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), microporosidade (Micro, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e macroporosidade (Macro, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) em cinco diferentes camadas de solo (0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Camada (m)                                       | T1    | T2    | T4    | T6    | T8    | Teste F            | CV <sup>(1)</sup> | Média |
|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------------------|-------|
| <b>Índice de estabilidade de agregados (IEA)</b> |       |       |       |       |       |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                          | 94,19 | 94,04 | 93,15 | 93,70 | 92,16 | 1,09 <sup>ns</sup> | 1,46              | 93,45 |
| 0,2-0,4                                          | 94,67 | 92,78 | 90,96 | 93,42 | 92,15 | 1,56 <sup>ns</sup> | 2,07              | 92,80 |
| 0,4-0,6                                          | 88,69 | 91,05 | 87,59 | 88,94 | 89,04 | 0,41 <sup>ns</sup> | 3,83              | 89,06 |
| 0,6-0,8                                          | 83,62 | 86,97 | 85,56 | 84,52 | 83,72 | 0,41 <sup>ns</sup> | 4,84              | 84,88 |
| 0,8-1,0                                          | 82,33 | 79,33 | 79,56 | 82,41 | 82,67 | 0,34 <sup>ns</sup> | 6,07              | 81,26 |
| <b>Grau de dispersão (GD)</b>                    |       |       |       |       |       |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                          | 67,73 | 69,49 | 69,40 | 69,44 | 67,83 | 0,19 <sup>ns</sup> | 5,28              | 68,78 |
| 0,2-0,4                                          | 69,59 | 70,10 | 72,90 | 75,15 | 68,77 | 1,03 <sup>ns</sup> | 6,35              | 71,30 |
| 0,4-0,6                                          | 63,98 | 69,57 | 68,79 | 70,40 | 66,27 | 1,45 <sup>ns</sup> | 5,60              | 67,80 |
| 0,6-0,8                                          | 61,74 | 64,63 | 69,37 | 68,65 | 63,32 | 1,66 <sup>ns</sup> | 6,84              | 65,54 |
| 0,8-1,0                                          | 63,28 | 61,26 | 67,68 | 67,40 | 62,28 | 1,03 <sup>ns</sup> | 7,87              | 64,38 |
| <b>Porosidade total (PT)</b>                     |       |       |       |       |       |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                          | 0,547 | 0,540 | 0,530 | 0,540 | 0,520 | 0,30 <sup>ns</sup> | 6,20              | 0,535 |
| 0,2-0,4                                          | 0,527 | 0,510 | 0,500 | 0,520 | 0,507 | 0,24 <sup>ns</sup> | 7,38              | 0,513 |
| 0,4-0,6                                          | 0,533 | 0,517 | 0,497 | 0,527 | 0,503 | 0,72 <sup>ns</sup> | 6,07              | 0,515 |
| 0,6-0,8                                          | 0,547 | 0,510 | 0,540 | 0,550 | 0,523 | 0,65 <sup>ns</sup> | 6,82              | 0,534 |
| 0,8-1,0                                          | 0,560 | 0,543 | 0,553 | 0,567 | 0,537 | 0,36 <sup>ns</sup> | 6,40              | 0,552 |
| <b>Microporosidade (Micro)</b>                   |       |       |       |       |       |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                          | 0,412 | 0,403 | 0,418 | 0,408 | 0,410 | 0,25 <sup>ns</sup> | 4,53              | 0,410 |
| 0,2-0,4                                          | 0,412 | 0,430 | 0,411 | 0,410 | 0,405 | 1,13 <sup>ns</sup> | 3,75              | 0,413 |
| 0,4-0,6                                          | 0,416 | 0,434 | 0,426 | 0,435 | 0,412 | 2,08 <sup>ns</sup> | 2,93              | 0,425 |
| 0,6-0,8                                          | 0,407 | 0,419 | 0,422 | 0,413 | 0,414 | 0,65 <sup>ns</sup> | 3,00              | 0,415 |
| 0,8-1,0                                          | 0,417 | 0,426 | 0,421 | 0,414 | 0,414 | 0,59 <sup>ns</sup> | 2,82              | 0,418 |
| <b>Macroporosidade (Macro)</b>                   |       |       |       |       |       |                    |                   |       |
| 0,0-0,2                                          | 0,138 | 0,136 | 0,110 | 0,134 | 0,113 | 0,43 <sup>ns</sup> | 28,39             | 0,126 |
| 0,2-0,4                                          | 0,115 | 0,079 | 0,090 | 0,110 | 0,102 | 0,36 <sup>ns</sup> | 42,80             | 0,099 |
| 0,4-0,6                                          | 0,118 | 0,081 | 0,069 | 0,093 | 0,092 | 0,90 <sup>ns</sup> | 36,39             | 0,091 |
| 0,6-0,8                                          | 0,140 | 0,094 | 0,120 | 0,137 | 0,109 | 0,70 <sup>ns</sup> | 33,12             | 0,120 |
| 0,8-1,0                                          | 0,141 | 0,117 | 0,131 | 0,155 | 0,122 | 0,67 <sup>ns</sup> | 24,14             | 0,133 |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nas Tabelas 19 e 20 é apresentada a porcentagem de distribuição dos parâmetros PST, CE, Ds, DMP (diâmetro médio de poros), IEA (índice de estabilidade de agregados), PT (porosidade total), Micro (microporosidade) e Macro (macroporosidade) no perfil do solo (em trincheira com dimensões 0,6x1,0 m, largura e profundidade, respectivamente), atribuindo três diferentes classes para cada parâmetro.

Tabela 19. Porcentagem de distribuição (%) dos parâmetros porcentagem de sódio trocável (PST, %), condutividade elétrica (CE, dS m<sup>-1</sup>) e densidade do solo (Ds, g cm<sup>-3</sup>), diâmetro médio de poros (DMP, mm), índice de estabilidade de agregados (IEA, %) e grau de dispersão (GD, %) em três diferentes classes observadas no perfil (0-1,0 m) de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, Campinas-SP.

| Parâmetro / Classe                               | T1     | T2    | T4    | T6     | T8     |
|--------------------------------------------------|--------|-------|-------|--------|--------|
| <b>Porcentagem de sódio trocável (PST)</b>       |        |       |       |        |        |
| 0,00-0,37                                        | 100,00 | 60,78 | 72,67 | 100,00 | 100,00 |
| 0,38-0,74                                        | 0,00   | 26,86 | 17,53 | 0,00   | 0,00   |
| 0,75-1,10                                        | 0,00   | 12,36 | 9,80  | 0,00   | 0,00   |
| <b>Condutividade elétrica (CE)</b>               |        |       |       |        |        |
| 0,04-0,08                                        | 55,87  | 12,57 | 44,55 | 63,20  | 64,25  |
| 0,09-0,12                                        | 26,98  | 49,55 | 44,88 | 30,80  | 27,08  |
| 0,13-0,16                                        | 17,15  | 37,88 | 10,57 | 6,00   | 8,67   |
| <b>Densidade do solo (Ds)</b>                    |        |       |       |        |        |
| 1,06-1,21                                        | 53,20  | 27,03 | 67,44 | 51,94  | 58,73  |
| 1,22-1,36                                        | 46,72  | 56,85 | 25,93 | 47,90  | 32,67  |
| 1,37-1,51                                        | 0,08   | 16,12 | 6,63  | 0,16   | 8,60   |
| <b>Diâmetro médio de poros (DMP)</b>             |        |       |       |        |        |
| 0,75-1,20                                        | 14,63  | 8,77  | 60,42 | 23,00  | 26,33  |
| 1,21-1,66                                        | 53,96  | 62,49 | 39,50 | 51,80  | 33,88  |
| 1,67-2,10                                        | 31,41  | 28,74 | 0,08  | 25,20  | 39,79  |
| <b>Índice de estabilidade de agregados (IEA)</b> |        |       |       |        |        |
| 75,0-81,99                                       | 4,32   | 19,04 | 18,05 | 10,85  | 6,32   |
| 82,0-88,99                                       | 50,03  | 36,22 | 49,03 | 45,06  | 44,80  |
| 89,0-95,99                                       | 45,65  | 44,74 | 32,92 | 44,09  | 48,88  |
| <b>Grau de dispersão (GD)</b>                    |        |       |       |        |        |
| 57,0-63,99                                       | 26,48  | 16,29 | 0,22  | 2,63   | 38,70  |
| 64,0-70,99                                       | 73,52  | 50,44 | 66,48 | 41,52  | 57,84  |
| 71,0-77,99                                       | 0,00   | 33,27 | 33,30 | 55,85  | 3,46   |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4.

Tabela 20. Porcentagem de distribuição (%) dos parâmetros porosidade total (PT,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), microporosidade (Micro,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e macroporosidade (Macro,  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) em três diferentes classes observadas no perfil (0-1,0 m) de um Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, Campinas-SP.

| Parâmetro / Classe             | T1     | T2    | T4    | T6    | T8    |
|--------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Porosidade total (PT)</b>   |        |       |       |       |       |
| 0,480-0,516                    | 0,00   | 42,55 | 53,46 | 2,67  | 43,83 |
| 0,517-0,553                    | 89,08  | 51,70 | 37,80 | 78,83 | 56,08 |
| 0,554-0,588                    | 10,92  | 5,75  | 8,74  | 18,50 | 0,09  |
| <b>Microporosidade (Micro)</b> |        |       |       |       |       |
| 0,365-0,397                    | 0,00   | 2,58  | 3,50  | 2,00  | 10,58 |
| 0,398-0,430                    | 100,00 | 68,50 | 85,00 | 84,92 | 88,67 |
| 0,431-0,455                    | 0,00   | 28,92 | 11,50 | 13,08 | 0,75  |
| <b>Macroporosidade (Macro)</b> |        |       |       |       |       |
| 0,055-0,103                    | 0,00   | 67,78 | 60,37 | 20,73 | 34,50 |
| 0,104-0,152                    | 97,00  | 28,06 | 39,63 | 73,86 | 65,42 |
| 0,153-0,190                    | 3,00   | 4,16  | 0,00  | 5,41  | 0,08  |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4.

Em geral, os tratamentos que receberam EET (T2 e T4) apresentaram maiores valores de PST no perfil do solo quando comparados ao tratamento sem irrigação (T1) e aos tratamentos com ARS (T6 e T8) (Tabela 17), o que está diretamente relacionado ao aporte de sódio ( $\text{Na}^+$ ) proporcionado pela aplicação de EET (item 5.4.2, Tabela 12). Além disso, os tratamentos T2 e T4 apresentaram distribuição espacial de PST em todas as classes estabelecidas, diferindo dos demais tratamentos que apresentaram distribuição de PST apenas na menor classe, ou seja, 0,00 a 0,37 % (Tabela 19).

A distribuição espacial dos dados de PST no perfil do solo é apresentada na Figura 17. Em todos os tratamentos irrigados, observou-se acúmulo de  $\text{Na}^+$  na região do bulbo úmido com aumento em profundidade, principalmente nos tratamentos com aplicação de EET (T2 e T4). Esse fato é decorrente da menor afinidade que o íon  $\text{Na}^+$  apresenta junto ao complexo de troca de cátions (CTC), quando comparado a outros cátions trocáveis. Segundo Holanda et al. (1998), em concentrações semelhantes, o sódio só é adsorvido no solo após as cargas serem preenchidas por  $\text{H}^+ \gg \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ , em ordem crescente de adsorção (influência da valência e raio iônico hidratado sobre a série dos cátions trocáveis). Assim, pode-se observar

maior concentração de  $\text{Na}^+$  na solução do solo, o que favorece seu deslocamento no perfil para maiores profundidades (HOLANDA et al., 1998; MORUGÁN-CORONADO et al., 2011).

Nesse sentido, ao associar a mobilidade de  $\text{Na}^+$  com sua contínua adição pela aplicação de EET, pode-se deduzir que problemas futuros com sodicidade da solução e do solo serão frequentes (LEAL et al. 2009b), inclusive com maior ocorrência no perfil do solo, pois elevadas e prolongadas precipitações são eficientes na remoção e deslocamento dos sais para maiores profundidades do solo (MOJID e WYSEURE, 2013), conforme observado no presente estudo a partir da migração do íon  $\text{Na}^+$  em profundidade.

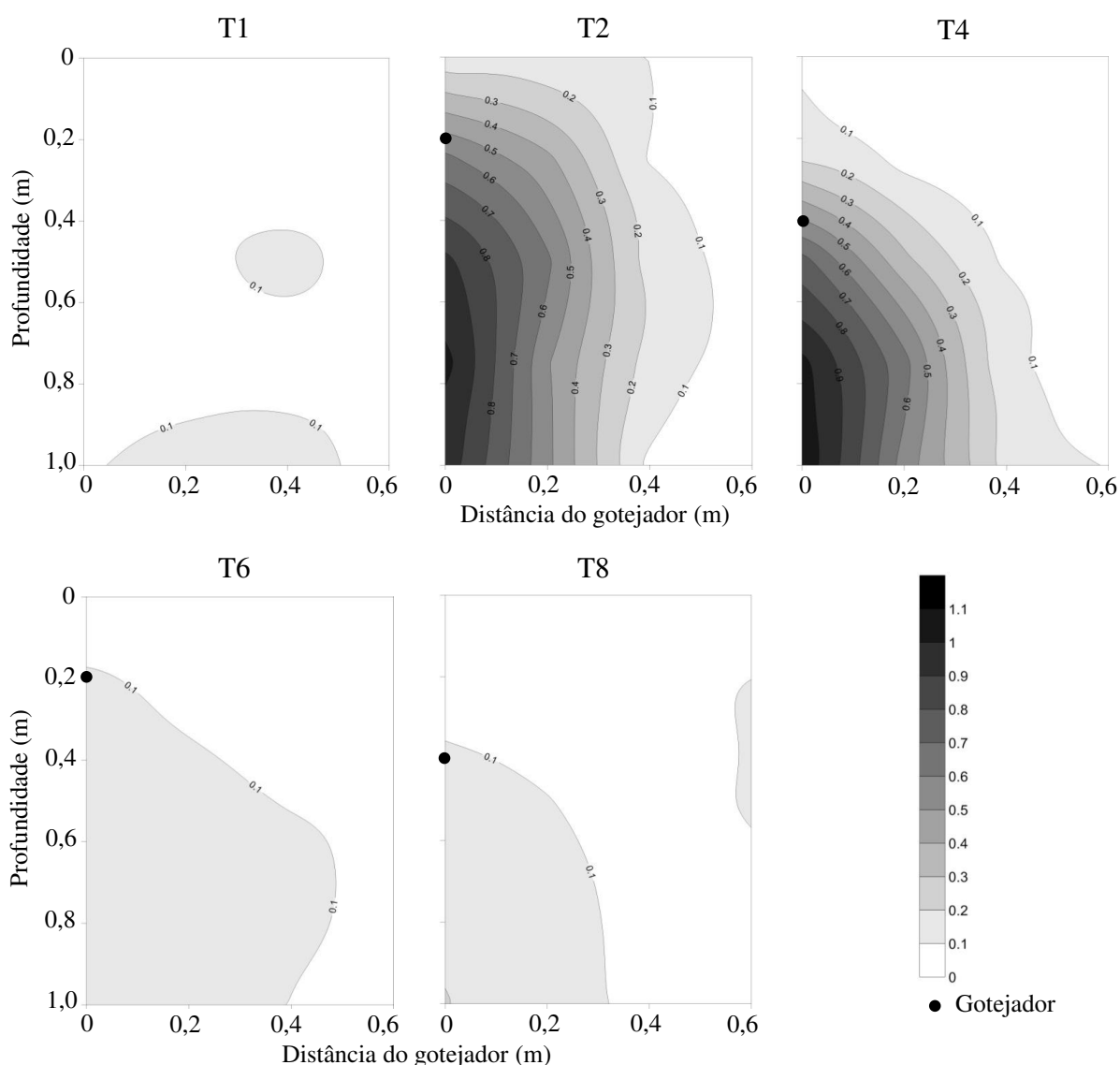


Figura 17. Distribuição espacial da porcentagem de sódio trocável (PST, %) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Notou-se que os valores de CE para a camada de 0-0,6 m de profundidade não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, já nas camadas mais profundas (0,6-1,0 m) houve aumento da CE para o tratamento T2 e T4 (irrigados com EET), sendo estes tratamentos superiores estatisticamente aos demais na última camada de solo avaliada (0,8-1,0 m) (Tabela 17). Com relação à Tabela 19, observou-se que o tratamento T2 apresentou maior acúmulo de sais (CE) nas duas últimas classes, o que pode ser decorrente da menor perda de água por percolação profunda (conforme apresentado no item 6.1).

Na Figura 18 é apresentada a distribuição espacial dos dados de CE no perfil do solo. Notou-se que as três primeiras camadas avaliadas apresentavam valores médios antes da implantação do experimento (0,189; 0,098; e 0,092 dS m<sup>-1</sup> para camada de 0,0-0,2; 0,2-0,4; e 0,4-0,6, respectivamente) próximo ao valor obtido após 2 ciclos de cultivo de cana-de-açúcar, independente da qualidade de água utilizada na irrigação.

O fato de ter sido observado maior acúmulo de sais em maiores profundidades pode estar diretamente relacionado às altas lâminas precipitadas, o que provocou lixiviação dos íons e, conseqüentemente, dificultou sua absorção, já que os sais distanciaram da região de maior acúmulo do sistema radicular (profundidade efetiva). Além disso, os íons de Na<sup>+</sup> observados no EET podem ter proporcionado maior contribuição no aumento de CE em profundidade, visto que esse elemento apresenta menor afinidade na CTC do solo quando comparado a outros cátions, permanecendo, em geral, na solução do solo e favorecendo sua lixiviação (LEAL et al., 2009a). De forma geral, observou-se que o valor de CE do solo não comprometeu o desenvolvimento da cana-de-açúcar (maior valor encontrado: 0,16 dS m<sup>-1</sup> para o tratamento T2 – Figura 18), pois a CE do solo começa a restringir a produção da cana-de-açúcar quando ultrapassa o limite de 1,7 dS m<sup>-1</sup> (AYERS e WESTCOT, 1994). Estudando o efeito da precipitação sobre a lixiviação dos sais, Andrade et al. (2004) observaram que as chuvas proporcionaram lixiviação de Na<sup>+</sup> (adicionado pela irrigação) para camadas mais profundas no perfil do solo.

Diante do aumento dos valores de PST observados no perfil do solo, destacam-se os possíveis danos que podem ser atrelados à estrutura do solo com aumento dos íons Na<sup>+</sup>, como: dispersão de argila, quebra de agregado, entupimento de poros e redução na permeabilidade do solo (BOND, 1998), dentre outros atributos físicos do solo. Por outro lado, Bond (1998) afirma que a complexa relação envolvendo solo, solução do solo e PST não permite inferir quais as reais implicações do íon Na<sup>+</sup> sobre as propriedades físicas do solo. Portanto, avaliações contínuas dos

atributos físicos do solo e dos teores de  $\text{Na}^+$  presentes no complexo de troca (PST) são necessárias para compreensão da relação solo-sódio *in loco*.

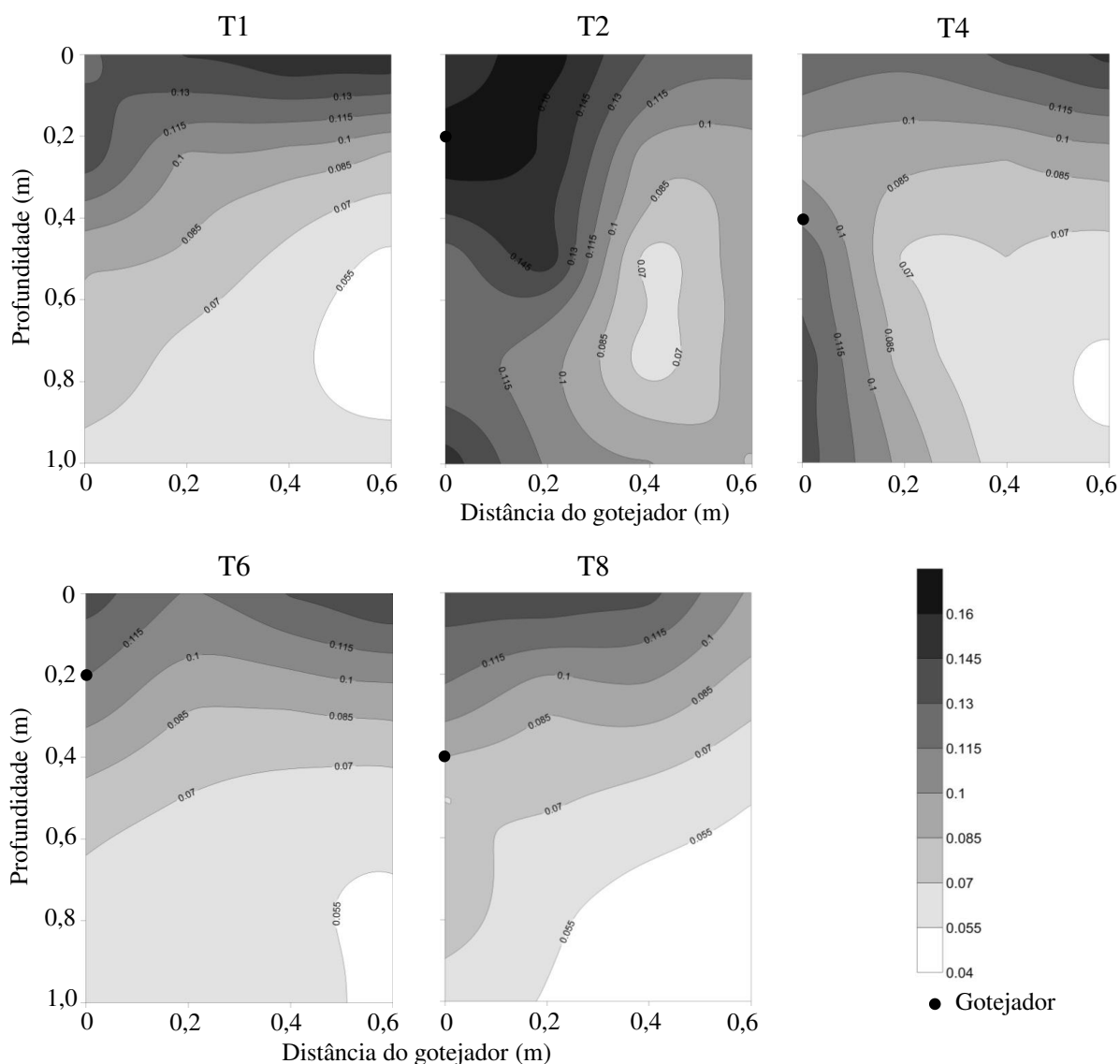


Figura 18. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo (CE,  $\text{dS m}^{-1}$ ) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Nesse sentido, ao avaliar os atributos físicos do solo observou-se diferença significativa para Ds na camada de 0,2-0,6 m entre os tratamentos, com o tratamento T2 apresentando valores estatisticamente superiores aos demais (Tabela 17) e maior porcentagem de distribuição nas maiores classes de Ds (Tabela 19). Entretanto, todos os valores de Ds observados em todos os tratamentos avaliados após 2 ciclos de cultivo da cana-de-açúcar permaneceram iguais ou



menores quando comparados aos valores obtidos antes da implantação do experimento (item 5.2, Tabela 6). Assim, pode-se atribuir que os maiores valores de Ds são decorrentes da compactação anterior à execução do experimento, o que se confirma, pois não houve entrada de máquinas agrícolas na área experimental (apenas na colheita da cana planta), além de não terem sido realizadas operações de aração e gradagem em área total para o plantio (sendo efetuados somente o enterrio dos tubos gotejadores e sulco para plantio das mudas de cana).

Quando se analisou a distribuição espacial dos dados de Ds (Figura 19), não observou interferência da qualidade de água de irrigação (EET ou ARS) sobre os valores de Ds, já que os tratamentos não apresentaram a mesma tendência nas proximidades do ponto emissor.

Ao comparar o tratamento testemunha (T1) com duas qualidades de água utilizadas (EET e ARS) não se observou diferença estatística para os parâmetros DMP, IEA, GD, PT, Micro e Macro nas cinco diferentes camadas de solo analisadas (Tabela 17 e 18). Assim, mesmo após a aplicação contínua de EET, o solo mostrou-se capaz de suportar o aporte de  $\text{Na}^+$  presente nessa água de irrigação sem afetar a estrutura do solo. Morugán-Coronado et al. (2011) avaliaram a porcentagem de agregados estáveis após a aplicação de água e EET e observaram comportamento semelhante para todos os tratamentos. Entretanto, destacam que os sucessivos ciclos de umedecimento e secagem do solo proporcionaram redução na estabilidade de agregados. Segundo os mesmos autores, os ciclos de umedecimento e secagem do solo é um dos processos mais importantes e que apresentam efeito direto sobre a estabilidade da estrutura do solo. Destaca-se que o método de irrigação utilizado na presente pesquisa (gotejamento subsuperficial) e a alta frequência de aplicação de água, proporcionaram baixa amplitude nos valores de umidade do solo, conseqüentemente, menores efeitos negativos à agregação do solo.

Não foi possível concluir se o uso de EET alterou os parâmetros DMP, IEA e GD, quanto à distribuição das classes utilizadas (Tabela 19). Em geral, a distribuição espacial dos dados de DMP (Figura 20), IEA (Figura 21) e GD (Figura 22) apresentaram os menores valores nas camadas mais profundas, além de confirmar que o uso de EET não foi responsável pela variação destes parâmetros no perfil do solo, principalmente na região próxima ao gotejador. Estes resultados estão em desacordo com Mojid e Wyseure (2013), pois estes afirmam que o uso contínuo de EET rico em  $\text{Na}^+$  provoca degradação estrutural do solo.

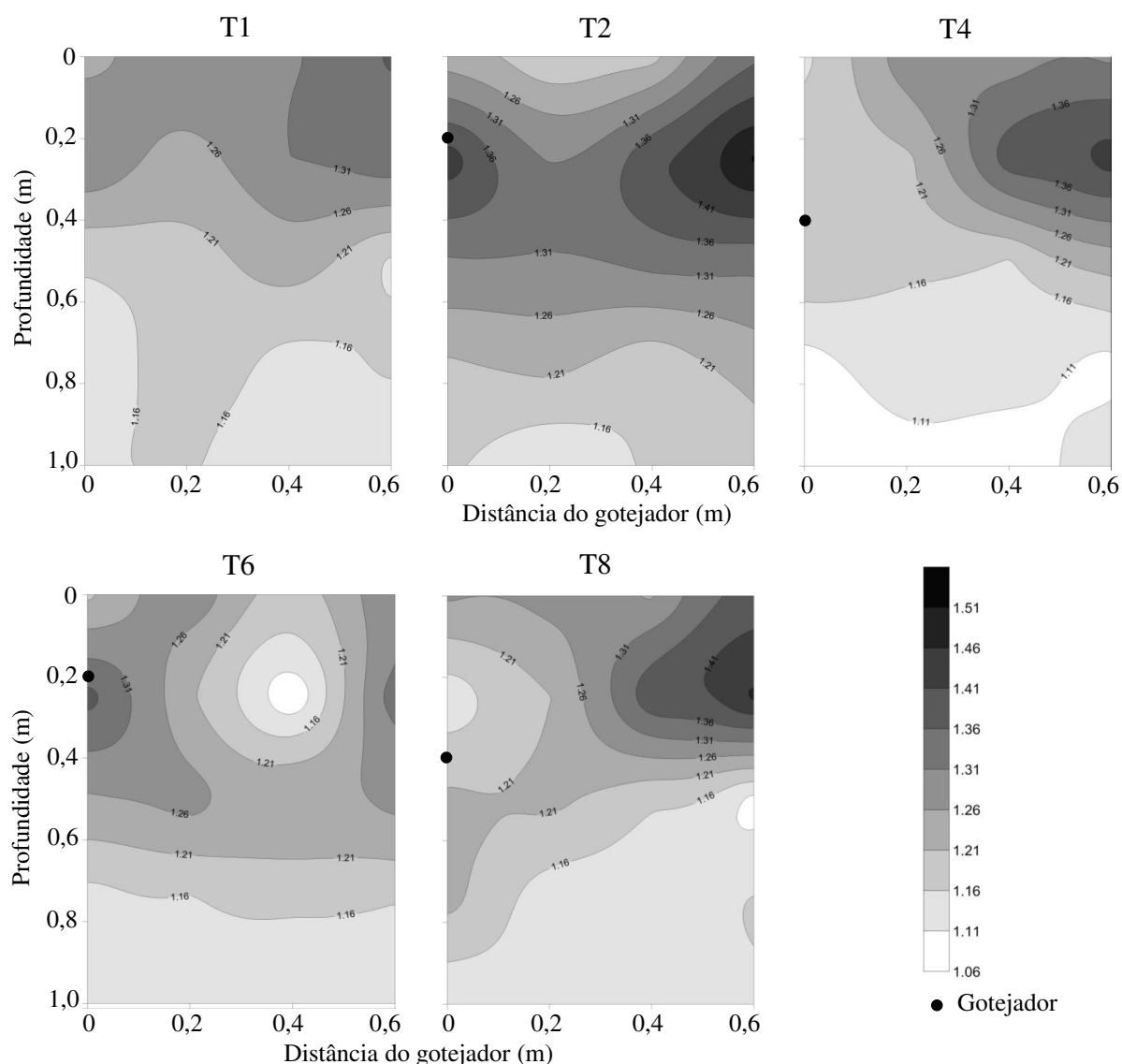


Figura 19. Distribuição espacial da densidade do solo ( $D_s$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ ) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Sabe-se que a valência dos cátions e a concentração eletrolítica da solução do solo influenciam ou não a expansão ou contração da dupla camada difusa (SUMMER, 1993; PRADO, 2003), resultando em dispersão ou floculação das partículas de argila do solo. Halliwell et al. (2001) ressaltam que em solos com altos teores de PST (>15%) a aplicação de águas com alto teor de CE evita a dispersão da argila. Para a presente pesquisa, o EET utilizado como água de irrigação foi classificado como leve a moderado (RAS: 3-6; CE: 1,3-0,25) (HALLIWELL et al., 2001), podendo resultar em problemas futuros com dispersão da argila e, consequentemente, alterar as propriedades físicas do solo. Mesmo aplicando EET rico em  $\text{Na}^+$ , Tzanakakis et al.

(2011) não observaram ocorrência de dispersão de argila do solo, o que pode ser devido ao alto teor de CE da água de irrigação.

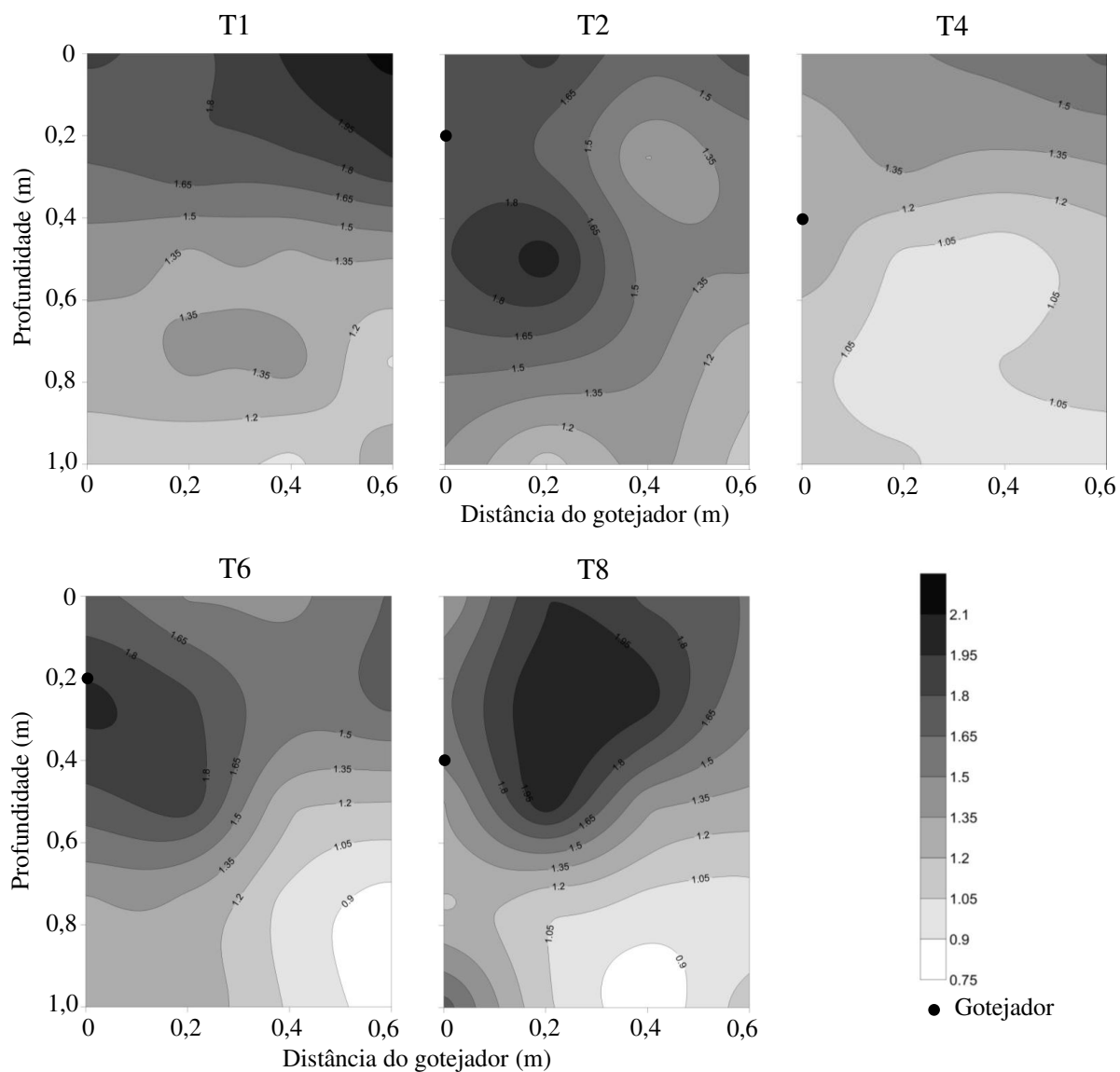


Figura 20. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

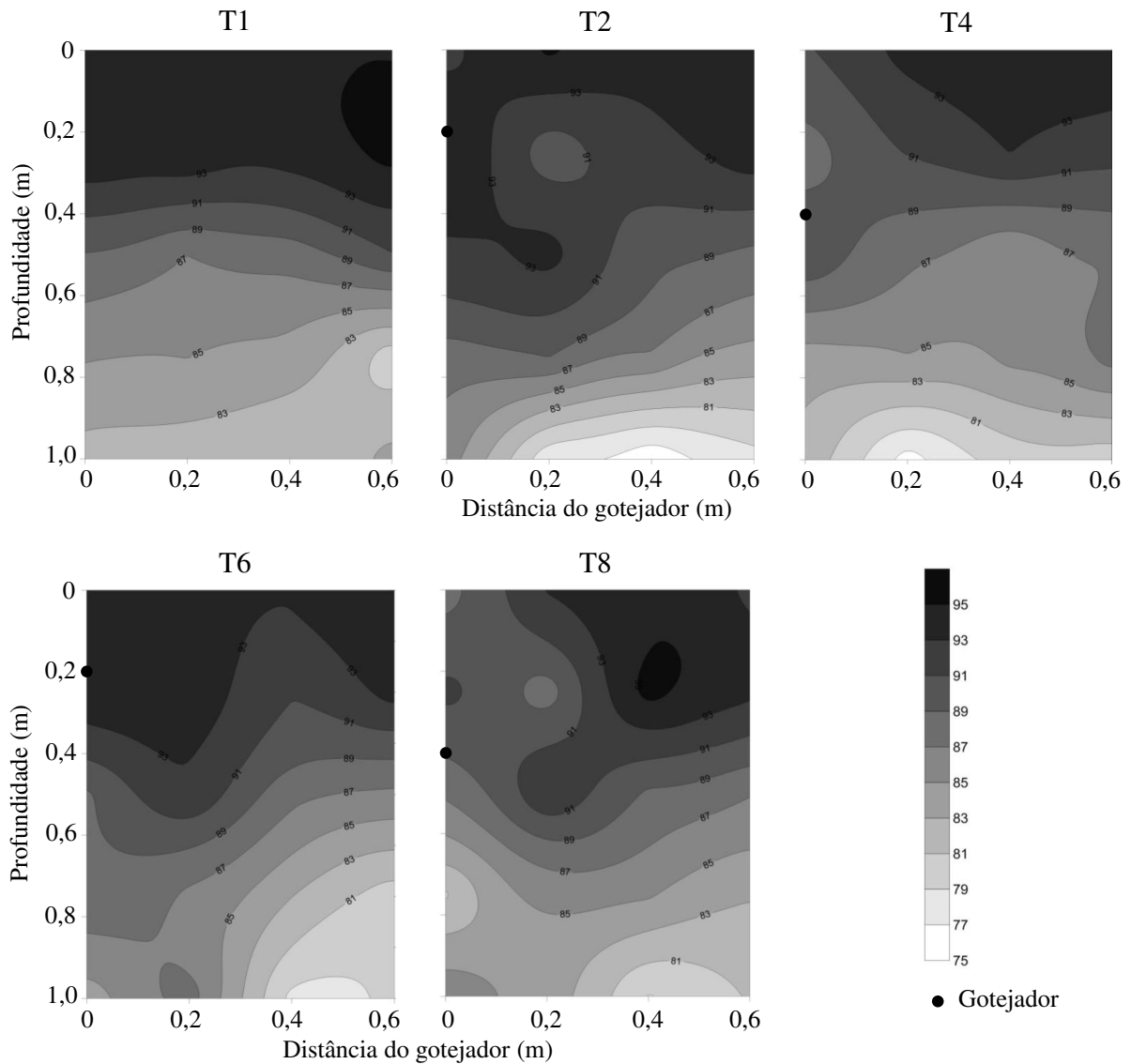


Figura 21. Distribuição espacial do índice de estabilidade de agregado (IEA, %) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

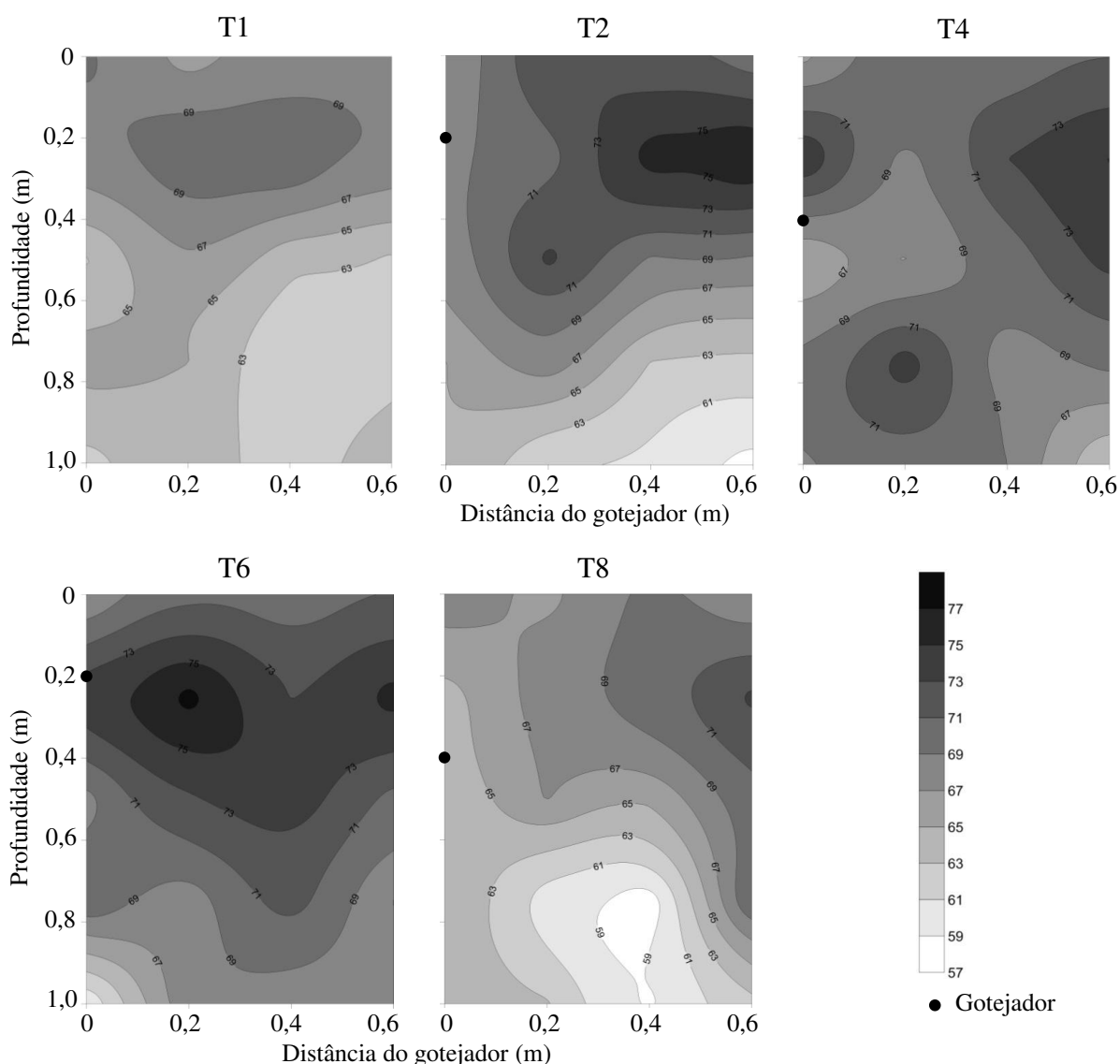


Figura 22. Distribuição espacial do grau de dispersão (GD, %) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Ao comparar os valores de PT, Macro e Micro antes da implantação do experimento (item 5.2, Tabela 6) com os valores médios obtidos após dois anos de cultivo com cana-de-açúcar (Tabela 18), notou-se aumento da PT e Macro em todas as profundidades, e Micro apresentando menor média na camada superficial (0-0,4 m). Quando é analisada a porcentagem de distribuição no perfil do solo (Tabela 20), observou-se que os tratamentos irrigados apresentaram redução da PT em relação ao tratamento testemunha (T1), principalmente os tratamentos T2, T4 e T8 que apresentaram mais de 40% da área avaliada na menor classe ( $0,480-0,516 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Ainda comparando o tratamento T1 com os demais (Tabela 18), observou-se aumento da Micro

(principalmente nos tratamentos T2, T4 e T6) e redução da Macro em todos os tratamentos irrigados. Vale destacar que a distribuição espacial dos parâmetros PT (Figura 23), Macro (Figura 24) e Micro (Figura 25) apresentaram tendência em acompanhar a formação do bulbo úmido, com ligeira redução para PT e Macro e aumento para Micro nas proximidades do emissor.

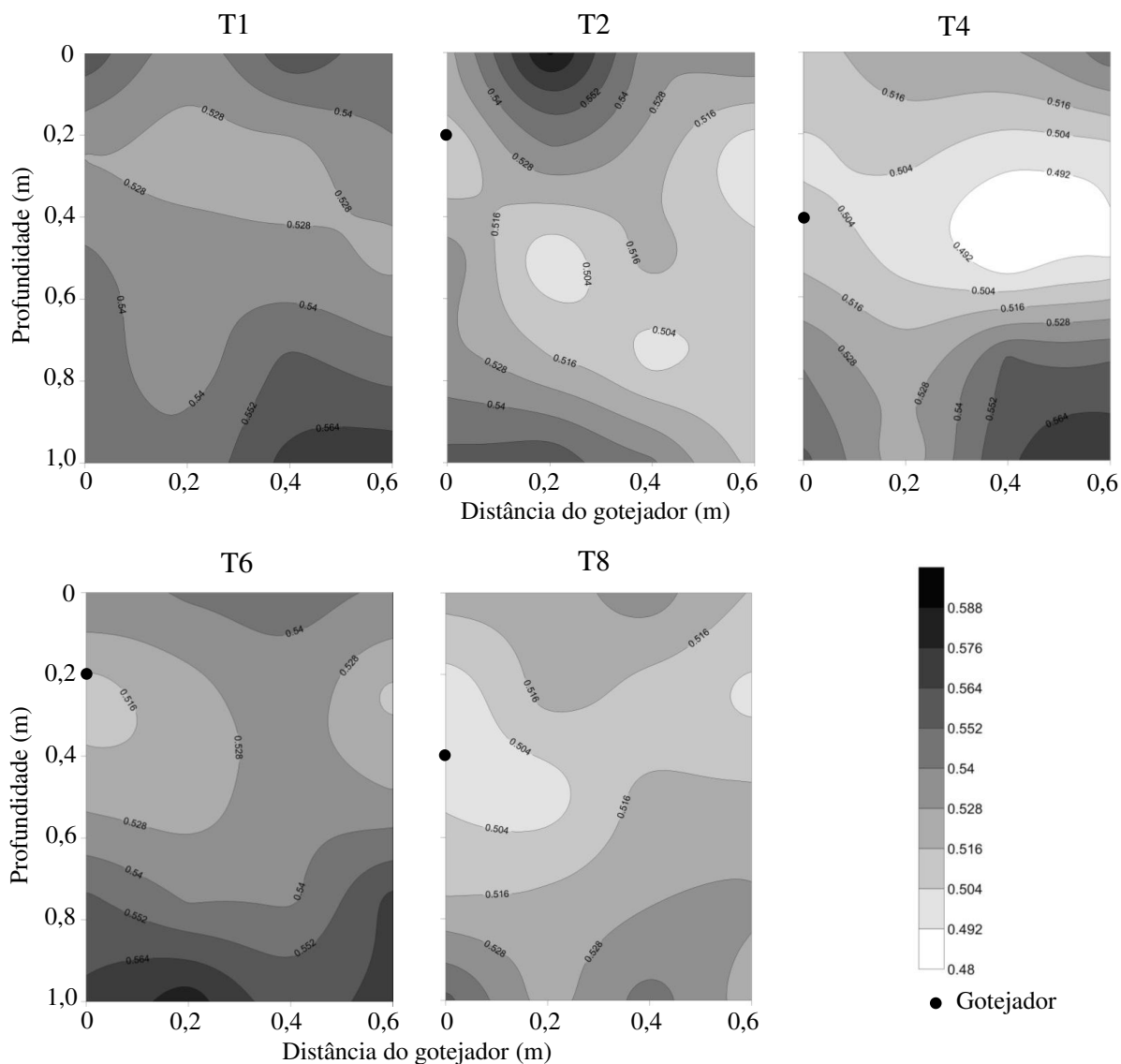


Figura 23. Distribuição espacial da porosidade total (PT,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

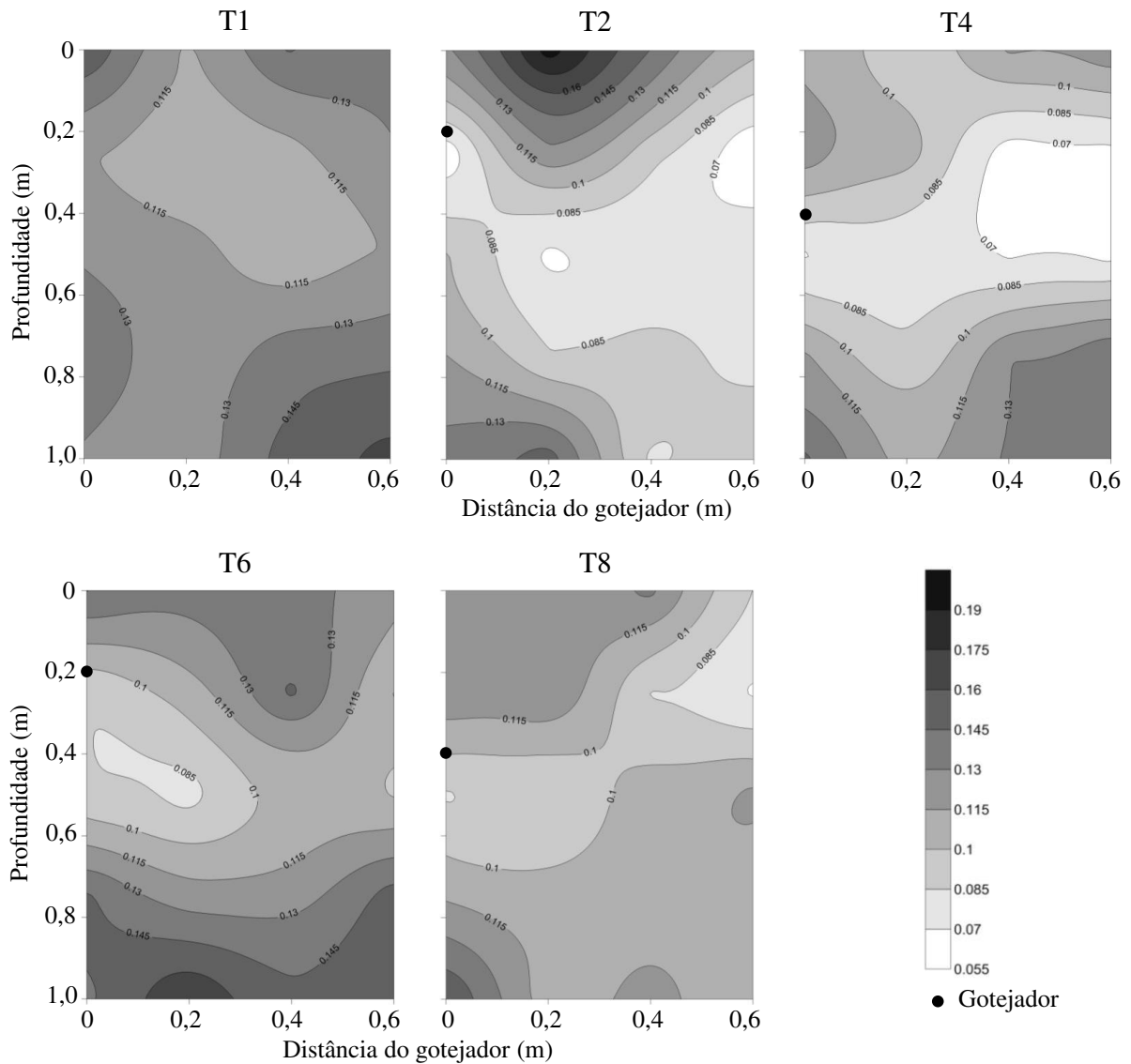


Figura 24. Distribuição espacial da macroporosidade (Macro,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

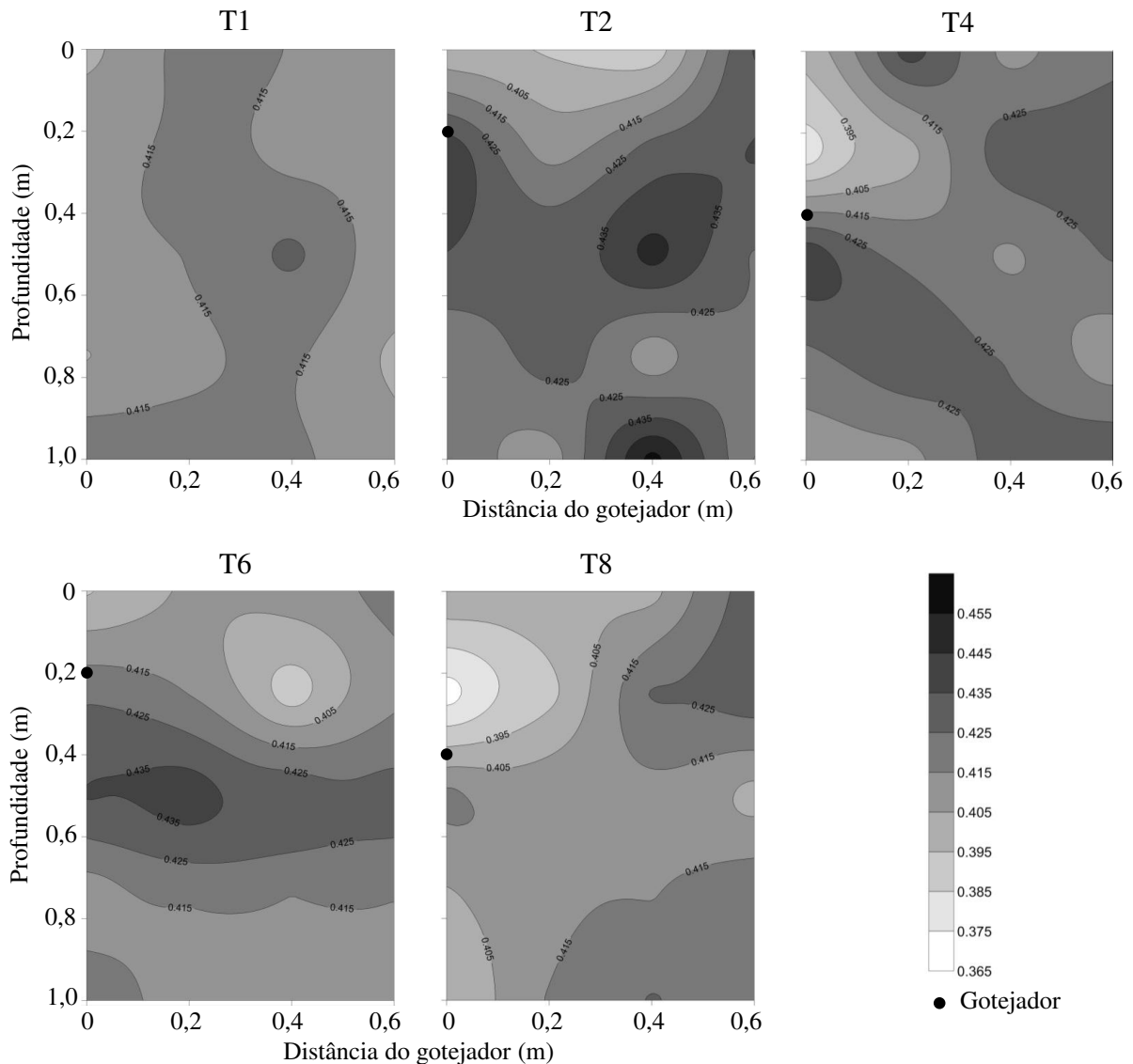


Figura 25. Distribuição espacial da microporosidade (Micro,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no perfil do solo. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Segundo Souza et al. (2010) a aplicação de águas residuárias com elevadas concentrações de sólidos suspensos totais (SST) podem reduzir a permeabilidade e Macro, além de aumentar a Micro. Assim, a quantidade de SST no EET utilizado na irrigação deve ser sempre inferior ao indicado pela FAO ( $<100 \text{ mg dm}^{-3}$ ; PESCOD, 1992), para evitar o entupimento dos poros do solo (MOJID e WYSEURE, 2013). Na presente pesquisa, os valores de SST sempre foram inferiores ao limite recomendado, tanto para ARS quanto EET (item 5.4.2, Tabela 12), indicando que o tratamento do esgoto foi eficiente na remoção de sólidos em suspensão. Contudo, pode-se inferir que a contínua aplicação de EET poderá contribuir para aumento do teor de íons  $\text{Na}^+$  na solução



do solo e no complexo de troca catiônica, resultando em maior probabilidade de ocorrência de argila dispersa e, conseqüentemente, em aumento da Ds e resistência à penetração. Leal et al. (2009b) sugerem que, independente da quantidade de EET aplicado, os valores de  $\text{Na}^+$  trocável e PST aumentam com uso contínuo de EET.

Observou-se nas Tabelas 21 e 22 que não houve diferença significativa entre os tratamentos avaliados (T1, T2, T4, T6 e T8) referente ao conteúdo de água no solo e à resistência do solo à penetração (RP), respectivamente, para quatro pontos de amostragem (um ponto sobre a projeção do tubo gotejador e os outros em paralelo ao mesmo) e quatro profundidades. A ocorrência de eventos sucessivos de precipitação (compreendendo três dias anteriores a realização destas análises, com lâmina total de 16,5 mm) explica o fato das umidades não diferirem estatisticamente, o que padronizou os resultados e possibilitou a comparação de RP entre os tratamentos.

Em geral, observou-se aumento gradativo da RP em camadas mais profundas do solo e em maiores distâncias do gotejador, visto que a amostragem foi realizada na entrelinha de cultivo (ponto 0,6), onde há menor concentração do sistema radicular e maior efeito do tráfego de máquinas (cumprе lembrar que não houve mecanização em área total no plantio da cana-de-açúcar, logo, a entrelinha apresenta efeito acumulado dos cultivos anteriores) (Tabela 22). Além disso, notou-se que os valores de RP após dois anos de cultivo com cana-de-açúcar (Tabela 22) apresentaram valores muito próximos daqueles observados antes da implantação do experimento (item 5.2, Tabela 8), principalmente nos pontos de coleta na linha gotejadora e de plantio (ponto 0; 0,2; e 0,4). Observou-se aumento da RP no ponto 0,6 (entrelinha) quando comparado aos valores obtidos antes da implantação experimental, conforme anteriormente discutido.

Segundo critérios estabelecidos pelo USDA (1993) para classificação do solo quanto à RP, percebeu-se que os valores de RP enquadravam-se como baixo (0,1 a 1,0 MPa), moderado (1,0 a 2,0 MPa) e alto (2,0 a 4,0 MPa). Segundo os autores, valores de RP superiores a 2,0 Mpa indicam forte restrição ao crescimento radicular para maioria das culturas anais. Por outro lado, Tormena et al. (2007) indicam que a RP de 3,5 MPa pode ser utilizada como limite de crescimento das plantas cultivadas sob plantio direto, já que a formação de bioporos contínuos e estáveis permite o crescimento e desenvolvimento radicular. Assim, mesmo que o cultivo ainda não se caracterize como plantio direto, pode-se afirmar que a RP observada não apresentou efeito

significativo sobre a cana-de-açúcar, já que os valores observados estavam abaixo do limite estabelecido por Tormena et al. (2007) (Tabela 22).

Tabela 21. Conteúdo de água no solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) para quatro pontos de amostragem (na projeção do tubo gotejador e em 3 pontos paralelos ao mesmo: 0,0; 0,2; 0,4; e 0,6 m, respectivamente) e em quatro camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; e 0,3-0,4 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.

| <b>Ponto -<br/>Camada (m)</b> | <b>T1</b> | <b>T2</b> | <b>T4</b> | <b>T6</b> | <b>T8</b> | <b>Teste F</b>     | <b>CV<sup>(1)</sup></b> | <b>DMS<sup>(2)</sup></b> |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| <b>Ponto 0,0</b>              |           |           |           |           |           |                    |                         |                          |
| 0,0-0,1                       | 0,253     | 0,262     | 0,247     | 0,264     | 0,257     | 0,46 <sup>ns</sup> | 6,77                    | 0,049                    |
| 0,1-0,2                       | 0,263     | 0,281     | 0,267     | 0,278     | 0,269     | 0,90 <sup>ns</sup> | 5,22                    | 0,040                    |
| 0,2-0,3                       | 0,275     | 0,285     | 0,285     | 0,283     | 0,286     | 0,50 <sup>ns</sup> | 4,03                    | 0,032                    |
| 0,3-0,4                       | 0,294     | 0,291     | 0,294     | 0,292     | 0,291     | 0,05 <sup>ns</sup> | 3,95                    | 0,007                    |
| <b>Ponto 0,2</b>              |           |           |           |           |           |                    |                         |                          |
| 0,0-0,1                       | 0,245     | 0,258     | 0,274     | 0,258     | 0,259     | 0,95 <sup>ns</sup> | 7,16                    | 0,052                    |
| 0,1-0,2                       | 0,265     | 0,266     | 0,266     | 0,268     | 0,278     | 0,52 <sup>ns</sup> | 4,74                    | 0,036                    |
| 0,2-0,3                       | 0,280     | 0,285     | 0,282     | 0,281     | 0,291     | 0,34 <sup>ns</sup> | 4,74                    | 0,038                    |
| 0,3-0,4                       | 0,291     | 0,292     | 0,296     | 0,291     | 0,296     | 0,38 <sup>ns</sup> | 2,60                    | 0,022                    |
| <b>Ponto 0,4</b>              |           |           |           |           |           |                    |                         |                          |
| 0,0-0,1                       | 0,247     | 0,260     | 0,256     | 0,248     | 0,246     | 0,83 <sup>ns</sup> | 4,65                    | 0,033                    |
| 0,1-0,2                       | 0,254     | 0,272     | 0,263     | 0,262     | 0,269     | 1,29 <sup>ns</sup> | 4,13                    | 0,031                    |
| 0,2-0,3                       | 0,269     | 0,274     | 0,272     | 0,273     | 0,265     | 0,35 <sup>ns</sup> | 3,89                    | 0,030                    |
| 0,3-0,4                       | 0,285     | 0,277     | 0,272     | 0,288     | 0,279     | 0,75 <sup>ns</sup> | 4,50                    | 0,036                    |
| <b>Ponto 0,6</b>              |           |           |           |           |           |                    |                         |                          |
| 0,0-0,1                       | 0,238     | 0,269     | 0,257     | 0,243     | 0,255     | 2,11 <sup>ns</sup> | 5,80                    | 0,041                    |
| 0,1-0,2                       | 0,256     | 0,266     | 0,261     | 0,257     | 0,264     | 0,47 <sup>ns</sup> | 4,15                    | 0,031                    |
| 0,2-0,3                       | 0,266     | 0,268     | 0,262     | 0,258     | 0,268     | 2,90 <sup>ns</sup> | 1,67                    | 0,013                    |
| 0,3-0,4                       | 0,272     | 0,271     | 0,272     | 0,274     | 0,271     | 0,06 <sup>ns</sup> | 3,30                    | 0,025                    |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; <sup>(2)</sup> Diferença mínima significativa; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(3)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 22. Resistência do solo à penetração (RP, Mpa) para quatro pontos de amostragem (na projeção do tubo gotejador e em 3 pontos paralelos ao mesmo: 0,0; 0,2; 0,4; e 0,6 m, respectivamente) e em quatro camadas (0,0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3; e 0,3-0,4 m) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Ponto -<br>Camada (m) | T1   | T2   | T4   | T6   | T8   | Teste F            | CV <sup>(1)</sup> | DMS <sup>(2)</sup> |
|-----------------------|------|------|------|------|------|--------------------|-------------------|--------------------|
| <b>Ponto 0,0</b>      |      |      |      |      |      |                    |                   |                    |
| 0,0-0,1               | 1,39 | 0,78 | 1,30 | 1,06 | 1,14 | 1,59 <sup>ns</sup> | 29,09             | 0,93               |
| 0,1-0,2               | 1,13 | 1,04 | 1,04 | 0,90 | 0,90 | 0,32 <sup>ns</sup> | 31,22             | 0,88               |
| 0,2-0,3               | 1,63 | 1,88 | 1,15 | 1,80 | 0,90 | 1,53 <sup>ns</sup> | 40,75             | 1,69               |
| 0,3-0,4               | 2,60 | 2,24 | 2,65 | 2,08 | 1,96 | 2,87 <sup>ns</sup> | 13,64             | 0,89               |
| <b>Ponto 0,2</b>      |      |      |      |      |      |                    |                   |                    |
| 0,0-0,1               | 0,92 | 1,03 | 1,16 | 1,01 | 1,38 | 2,26 <sup>ns</sup> | 18,63             | 0,58               |
| 0,1-0,2               | 1,14 | 0,85 | 1,21 | 0,96 | 1,10 | 1,03 <sup>ns</sup> | 23,73             | 0,70               |
| 0,2-0,3               | 1,61 | 0,83 | 1,22 | 1,05 | 1,05 | 0,90 <sup>ns</sup> | 46,15             | 1,50               |
| 0,3-0,4               | 2,72 | 2,17 | 2,51 | 1,82 | 2,20 | 2,36 <sup>ns</sup> | 17,00             | 1,10               |
| <b>Ponto 0,4</b>      |      |      |      |      |      |                    |                   |                    |
| 0,0-0,1               | 1,21 | 0,97 | 2,01 | 1,65 | 1,71 | 2,73 <sup>ns</sup> | 28,95             | 1,23               |
| 0,1-0,2               | 1,66 | 1,52 | 2,12 | 1,77 | 2,01 | 0,50 <sup>ns</sup> | 33,21             | 1,70               |
| 0,2-0,3               | 2,37 | 2,52 | 2,47 | 2,23 | 2,79 | 0,63 <sup>ns</sup> | 18,51             | 1,29               |
| 0,3-0,4               | 2,94 | 3,35 | 2,59 | 2,83 | 2,83 | 1,45 <sup>ns</sup> | 13,83             | 1,13               |
| <b>Ponto 0,6</b>      |      |      |      |      |      |                    |                   |                    |
| 0,0-0,1               | 1,57 | 1,55 | 1,66 | 1,97 | 2,00 | 1,33 <sup>ns</sup> | 18,75             | 0,93               |
| 0,1-0,2               | 1,82 | 2,07 | 2,37 | 2,45 | 2,25 | 1,10 <sup>ns</sup> | 19,11             | 1,18               |
| 0,2-0,3               | 2,56 | 2,55 | 2,95 | 3,00 | 2,46 | 0,50 <sup>ns</sup> | 22,81             | 1,74               |
| 0,3-0,4               | 2,84 | 3,28 | 3,63 | 3,20 | 3,25 | 0,96 <sup>ns</sup> | 15,32             | 1,40               |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; <sup>(2)</sup> Diferença mínima significativa; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(3)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Ao analisar os dados de condutividade hidráulica do solo saturado (Ks) em cinco diferentes profundidades coletados na projeção do tubo gotejador (ponto 0,0) (Tabela 23), observou-se aumento na grandeza dos dados e maior discrepância quando comparados aos dados obtidos antes da instalação do experimento (item 5.2, Tabela 6). Balks et al. (1998) observaram aumento da PST e redução da Ks com aplicação de EET, mas sem restrição do fluxo de água no solo, concluíram que o aumento da PST do solo em curto prazo não impediria a contínua aplicação de EET, mas poderia afetar a aptidão do solo para diferentes usos no futuro.

Tabela 23. Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_s$ ,  $\text{cm h}^{-1}$ ) em cinco diferentes camadas de solo (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; e 0,8-1,0 m) na projeção do tubo gotejador (Ponto 0,0) para cultivo de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Camada (m) | Fator             | T1     | T2    | T4     | T6     | T8     |
|------------|-------------------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 0,0-0,2    | Média             | 19,22  | 27,54 | 42,56  | 26,61  | 26,43  |
|            | CV <sup>(1)</sup> | 17,26  | 11,69 | 85,35  | 110,59 | 64,13  |
| 0,2-0,4    | Média             | 3,60   | 9,80  | 34,40  | 8,37   | 48,66  |
|            | CV                | 69,27  | 89,24 | 147,33 | 147,05 | 60,29  |
| 0,4-0,6    | Média             | 14,94  | 7,09  | 8,20   | 6,04   | 7,77   |
|            | CV                | 76,08  | 84,68 | 83,07  | 34,84  | 89,93  |
| 0,6-0,8    | Média             | 15,23  | 3,26  | 13,22  | 27,21  | 9,22   |
|            | CV                | 49,35  | 61,72 | 100,10 | 117,71 | 138,19 |
| 0,8-1,0    | Média             | 18,71  | 18,00 | 17,31  | 18,84  | 27,29  |
|            | CV                | 103,90 | 30,98 | 71,21  | 37,13  | 89,11  |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem.

Por último, vale destacar que o pouco tempo experimental (2 anos) e o uso de EET com propriedades físico-químicas com baixa capacidade de impactar o ambiente não proporcionaram efeitos significativos às propriedades físicas do solo. No entanto, faz-se necessário o acompanhamento dos parâmetros físicos do solo a médio e longo prazo, visto que a qualidade físico-química do efluente pode sofrer alterações e, conseqüentemente, provocar diferentes reações no solo.

## 6.4 Parâmetros vegetativos da cana-de-açúcar

### 6.4.1 Sistema radicular

Na Figura 26 é apresentado o número de perfilhos em um metro na 1ª soca de cana-de-açúcar. Não houve diferença entre os tratamentos avaliados para número de plantas, retratando uniformidade do estande entre as parcelas onde foram realizadas as avaliações do sistema radicular, para as duas épocas de amostragem.

Johnson et al. (2001) recomendam que seja aguardado tempo de equilíbrio para minimizar o efeito de perturbação ocorrida no solo pela instalação do tubo de acesso. Assim, na Figura 27 é apresentada a densidade de comprimento radicular (DCR) obtida em duas amostragens consecutivas durante a 1ª soca da cana-de-açúcar, que ocorreram aos 26 e 89 dias após a instalação dos tubos de acrílico (189 e 252 dias após a colheita, respectivamente). Observou-se,

que os valores de DCR apresentaram a mesma tendência em profundidade para as duas amostragens, com pequena variação na ordem de grandeza dos resultados.

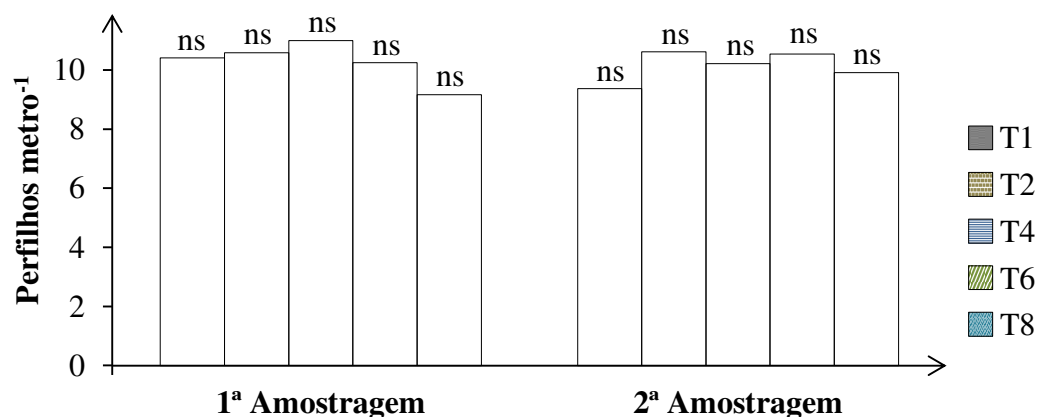


Figura 26. Número de perfilhos por metro para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita). (Onde: ns= médias não significativas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Estatisticamente, o DCR do tratamento sequeiro (T1) não diferiu dos tratamentos irrigados com EET (T2 e T4) e ARS (T6 e T8), o que pode ter ocorrido em função das elevadas precipitações, padronizando o crescimento radicular nos tratamentos avaliados (Figura 27). Resultados similares foram observados por Alvarez et al. (2000), Farias et al. (2008), Santos (2010) e Sousa et al. (2013). Além disso, não houve diferenciação para o DCR nas diferentes profundidades de instalação dos tubos gotejadores (0,2 e 0,4 m) (Figura 27), segundo Kamara et al. (1991), a profundidade de instalação do gotejador não afetará o desenvolvimento radicular para regiões onde há incidência de altas lâminas precipitadas.

Apesar de não ter sido observada diferença estatística entre os tratamentos, salienta-se que a DCR obtida no tratamento T1 para a 2ª amostragem apresentou valores numericamente superiores aos demais tratamentos (Figura 27), o que pode estar relacionada à menor lâmina de precipitação acumulada em dois meses antes da 2ª amostragem (totalizando 120 mm) quando comparado aos dois meses antes da 1ª amostragem (totalizando 517 mm), proporcionando menor disponibilidade hídrica e, consequentemente, favorecendo o desenvolvimento radicular em profundidade. Corroborando com estes resultados, Sousa et al. (2013) constataram maior desenvolvimento das raízes de cana em profundidade para tratamento sequeiro quando comparado aos tratamentos irrigados.

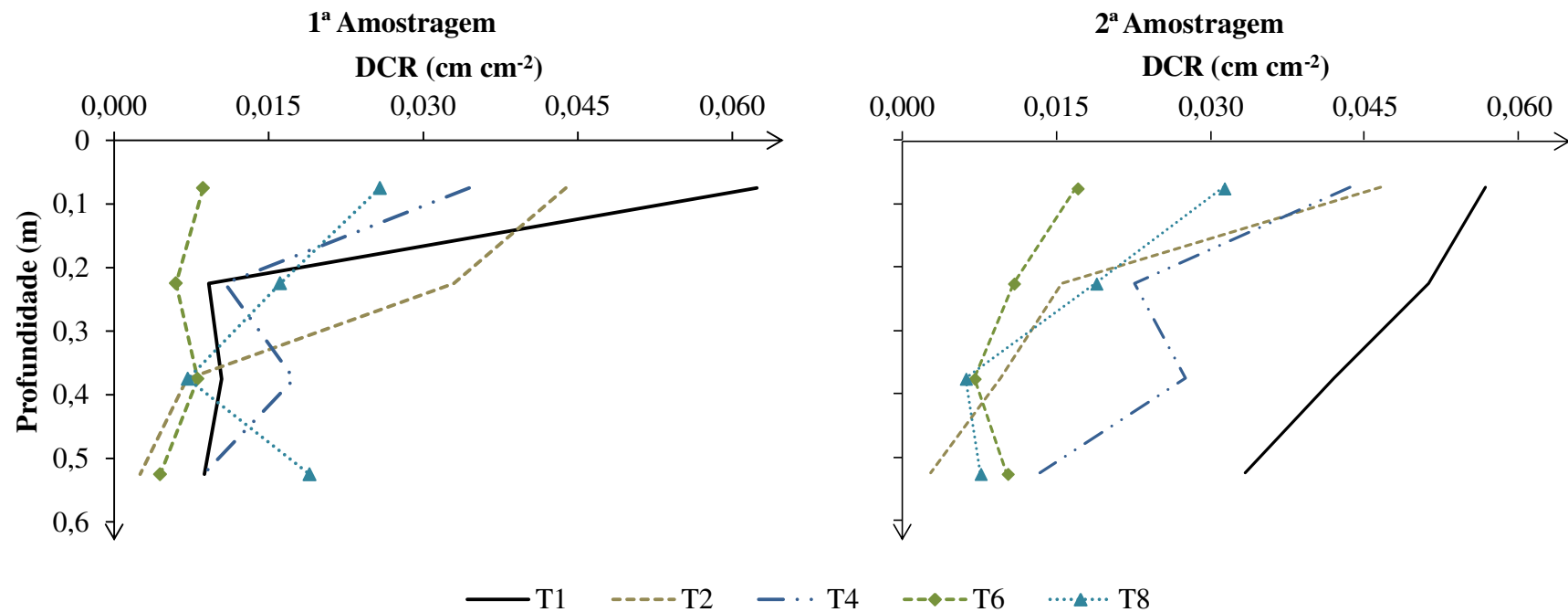


Figura 27. Densidade de comprimento radicular (DCR) em quatro camadas no perfil do solo (0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,45; e 0,45-0,6 m) para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita). (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).

Além disso, a menor umidade do solo na camada superficial do cultivo em sequeiro (T1) também pode ter minimizado o crescimento das raízes. Vasconcelos e Dinardo-Miranda (2011) afirmam que em solos secos existe maior dificuldade de crescimento radicular em camadas superficiais, resultando no seu aprofundamento. Concordando com os dados anteriormente apresentados, Laclau e Laclau (2009) verificaram redução da DCR na camada superficial do solo (proporcionado por um curto período de seca), resultando numa distribuição homogênea das raízes no perfil do solo até 1 m. Santos (2010) encontrou maior concentração das raízes de cana planta (variedade RB86-7515) em profundidade para tratamento sequeiro, não verificando diferença para distribuição radicular entre tratamento sequeiro e irrigado na 1ª soca. O aprofundamento das raízes para tratamento sequeiro na cana planta observado por Santos (2010) pode ter sido proporcionado pelo maior déficit hídrico, corroborando com os resultados observados na presente pesquisa (Figura 27).

Considerando que a profundidade efetiva do sistema radicular deve ser aquela onde se concentra 80% das raízes (BERNARDO et al., 2008), observou-se que todos os tratamentos avaliados, tanto os irrigados quanto o sequeiro, apresentaram profundidade efetiva até 0,45 m (Figura 28). Apesar de o presente trabalho ter avaliado o sistema radicular até 0,6 m de profundidade, os resultados observados estão em concordância com diversos estudos do sistema radicular da cana-de-açúcar. Alvarez et al. (2000) encontraram 72 e 75% das raízes para cana colhida com e sem queima, respectivamente, nos primeiros 0,4 m de profundidade na 1ª soca; e 68 e 70% das raízes para cana colhida com e sem queima, respectivamente, nos primeiros 0,4 m de profundidade na 2ª soca. Faroni e Trivelin (2006) observaram 90% das raízes metabolicamente ativas entre 0-0,4 m de profundidade. Segato et al. (2006) afirmam que 85% do sistema radicular se concentra a 0,50 m de profundidade. Farias et al. (2008) obteve 90 e 80% das raízes em sistema irrigado e sequeiro, respectivamente, nos primeiros 0,60 m de profundidade. Sousa et al. (2013) observaram a mesma profundidade efetiva do sistema radicular (0,4 m) para o tratamento sequeiro e para os tratamentos irrigados com 100 e 200% de lâmina de irrigação baseado na evapotranspiração da cultura (utilizando EET).

O fato do tratamento sequeiro (T1) ter apresentado maior incremento de DCR nas camadas mais profundas entre a 1ª e 2ª amostragens (Figura 27) e, conseqüentemente, uma redução na % acumulada de raiz nas primeiras camadas do perfil do solo (Figura 28) permitiram

observar o efeito do volume e da distribuição das chuvas no desenvolvimento radicular da cultura da cana-de-açúcar.

Embora o tratamento das imagens seja moroso, cumpre salientar o desempenho da análise de raiz via *minirhizotron*, que se destacou como técnica não destrutiva e que permitiu o acompanhamento contínuo no mesmo ponto de amostragem (a partir de uma única instalação do tubo de acesso) e, acima de tudo, proporcionou resultados condizentes ao encontrado na literatura.

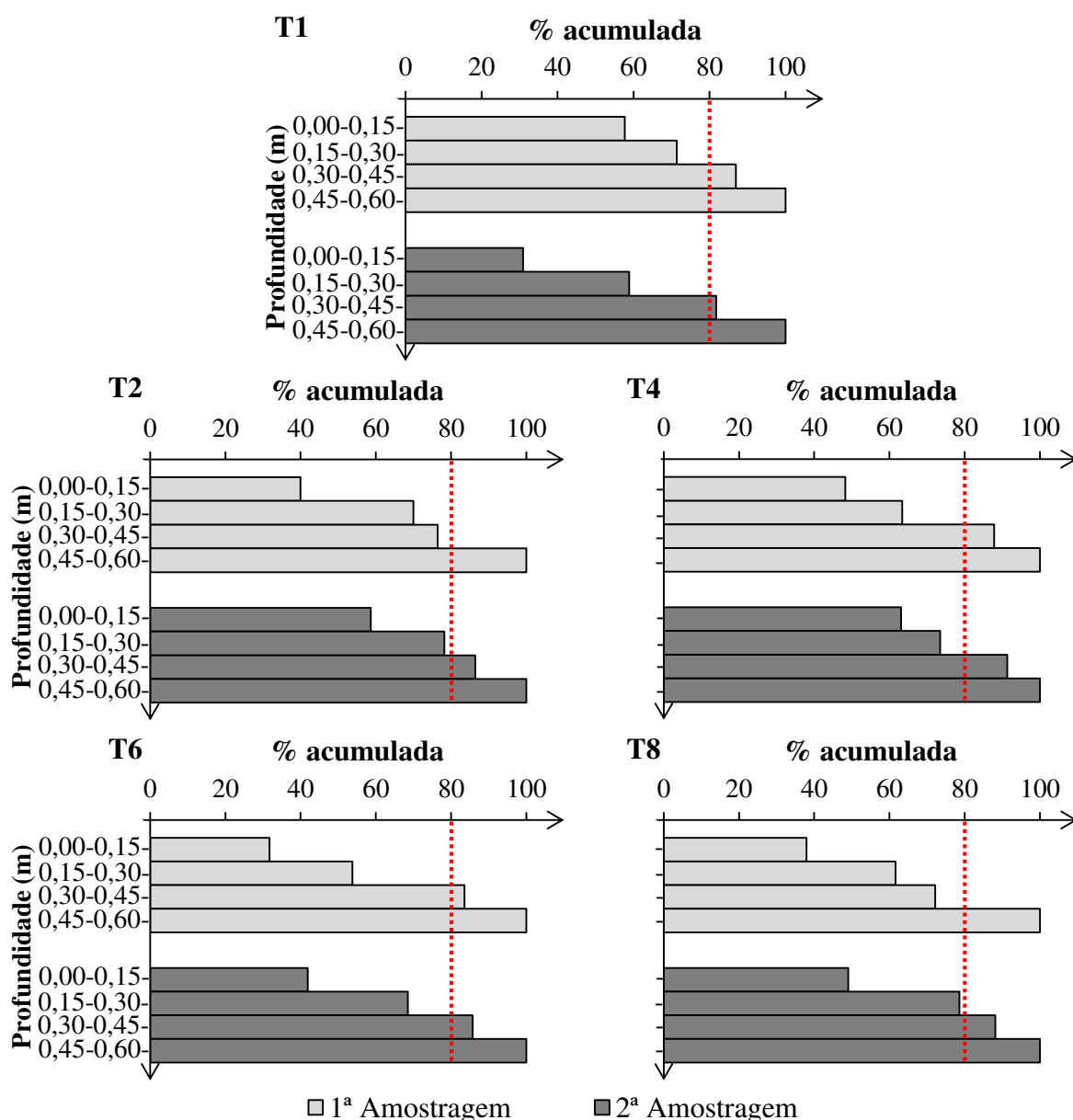


Figura 28. Porcentagem acumulada de raízes no perfil do solo para 1ª soca de cana-de-açúcar em duas amostragens (189 e 252 dias após a colheita). (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T8= ARS-CN-0,4).



#### 6.4.2 Atributos tecnológicos e produtividade da cana-de-açúcar

A Figura 29 ilustra a variação do número de perfilhos por metro de cana-de-açúcar em sucessivas amostragens no decorrer dos dois ciclos de cana-de-açúcar avaliados. Verificou-se que o perfilhamento apresentou tendência similar em todos os tratamentos, com número elevado de plantas por estande no início do ciclo e com redução no decorrer do desenvolvimento da cultura até estabilização no número de plantas. Esse comportamento se deve às características fisiológicas da cana-de-açúcar (SILVA et al., 2007), pois o crescimento da planta promove competição por luz, água e nutrientes (CASAGRANDE e VASCONCELOS, 2010).

O máximo perfilhamento observado na cana planta ocorreu aos 247 DAP (com 13,8 perfilhos  $m^{-1}$  para o tratamento sequeiro, T1) e na 1ª soca aos 131 DAC (com 16,17 perfilhos  $m^{-1}$  para T5). Em seguida, a estabilização do estande aconteceu aos 358 DAP na cana planta e aos 251 DAC na 1ª soca, onde os maiores valores observados foram no T4 (9,0 perfilhos  $m^{-1}$  na cana planta) e T2 (10,63 perfilhos  $m^{-1}$  na 1ª soca), destacando-se que estes últimos tratamentos (T2 e T4) receberam aplicação de EET e fertirrigação. Ao avaliar a produção e qualidade da cana-de-açúcar (variedade RB72-454), Dalri et al. (2008) observaram 27,81 perfilhos  $m^{-1}$  para os tratamentos irrigados e 22,63 perfilhos  $m^{-1}$  para o tratamento testemunha (sequeiro), valores superiores aos obtidos no presente trabalho.

Vale ressaltar a ocorrência de fatores externos não planejados que provocaram injúrias ao experimento no decorrer da cana planta, como: 1- baixas temperaturas no período de germinação; 2- entrada de roedores (capivaras) na área experimental que se alimentavam dos perfilhos emergidos; 3- tombamento na fase de maturação. Ainda é importante considerar que o atraso na instalação da irrigação por gotejamento implicou em uso da irrigação por aspersão para uniformizar e garantir a adequada brotação e desenvolvimento inicial da cana planta.

O acompanhamento da maturação da cana-de-açúcar foi realizado por meio de análise tecnológica obtidas aos 358, 408 e 482 DAP para cana planta e aos 258, 281 e 348 DAC para 1ª soca. Independente do ciclo avaliado percebeu-se que a qualidade da cana-de-açúcar foi crescente entre a primeira e terceira amostragem, com aumento do teor de Brix, Pol, Pureza, Fibra, ATR, e redução do AR (Figuras 30, 31 e 32).

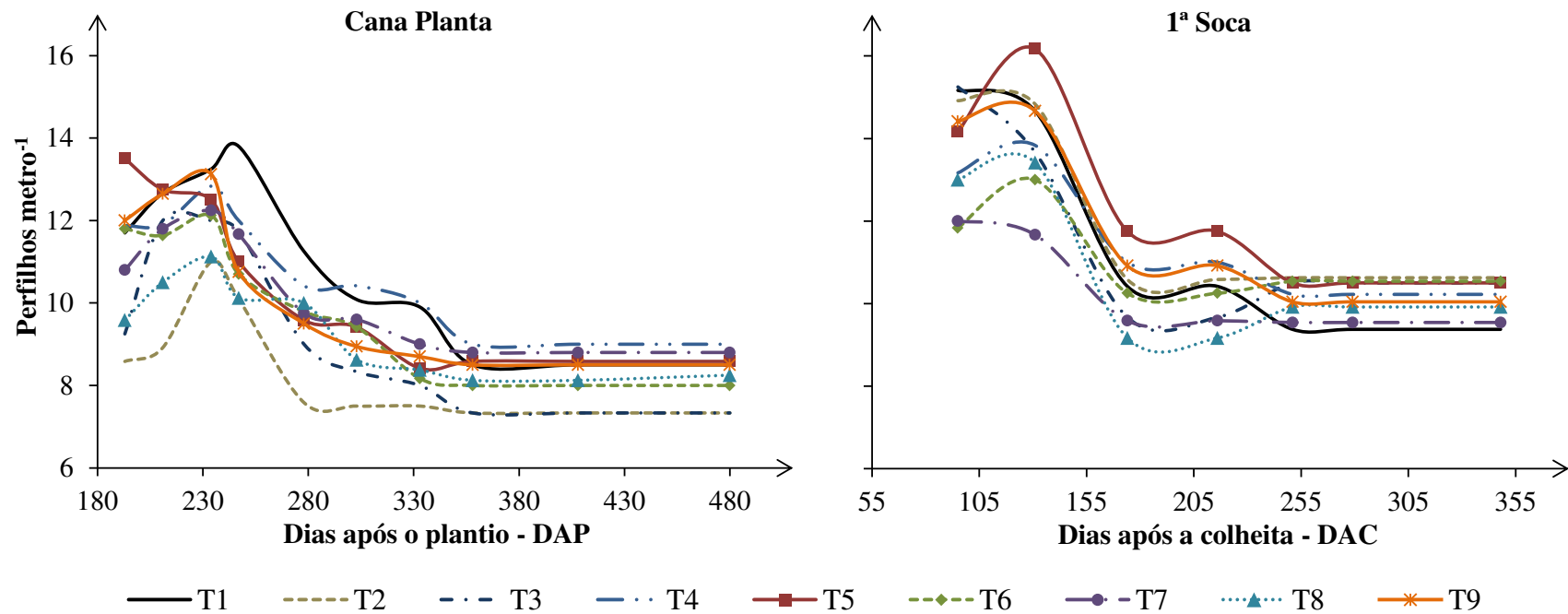


Figura 29. Número de perfilhos por metro no decorrer do cultivo da cana planta e 1ª soca de cana-de-açúcar. (Onde: T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

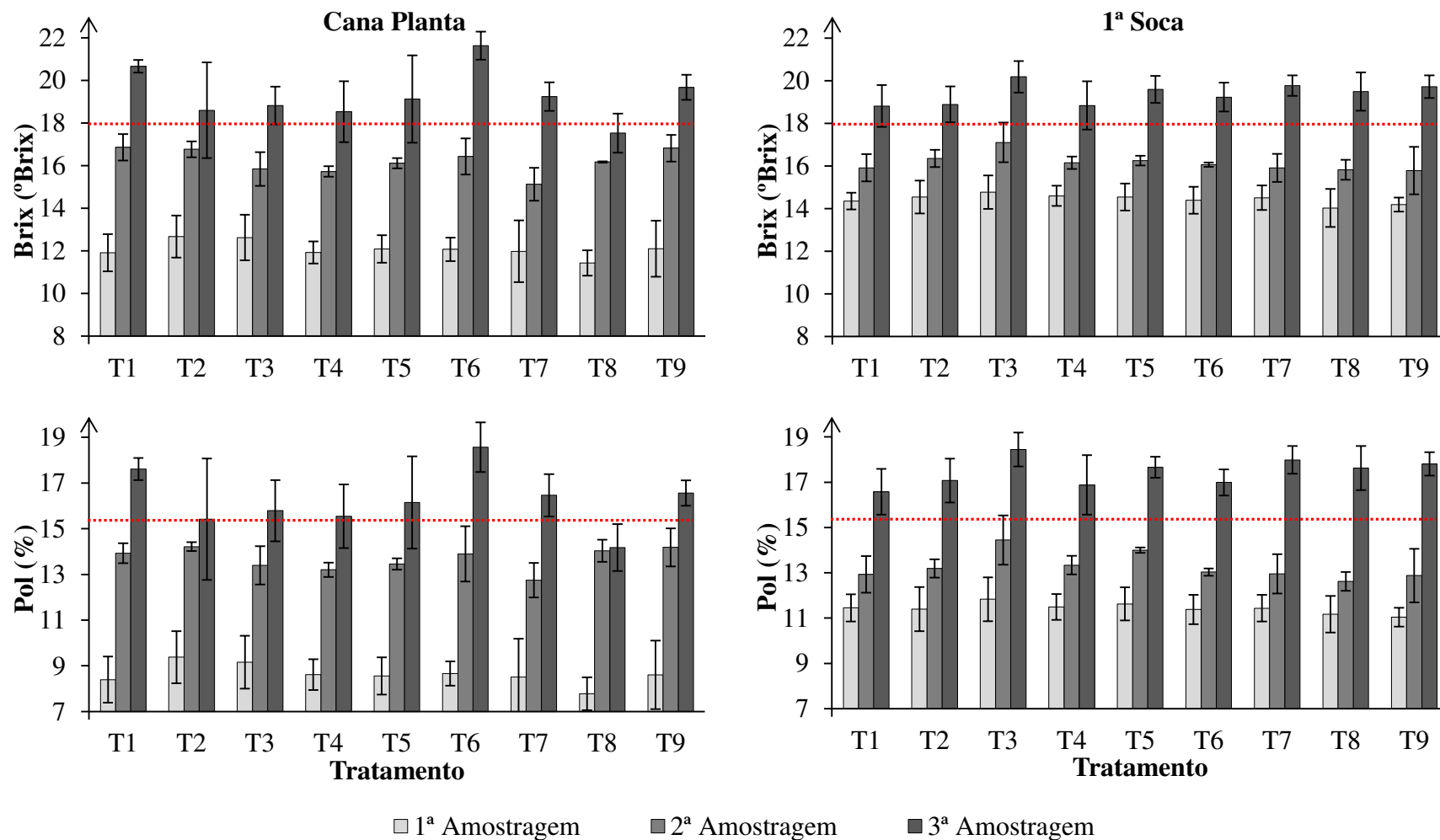


Figura 30. Resultado das análises de Brix (Teor de sólidos solúveis do caldo, °Brix) e Pol (Teor de sacarose aparente do caldo, %) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) de cana-de-açúcar. (Onde: linha pontilhada= níveis de referência segundo FERNANDES (2000) e RODRIGUES (1995); barra transversal= desvio padrão ( $\pm$ ); T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

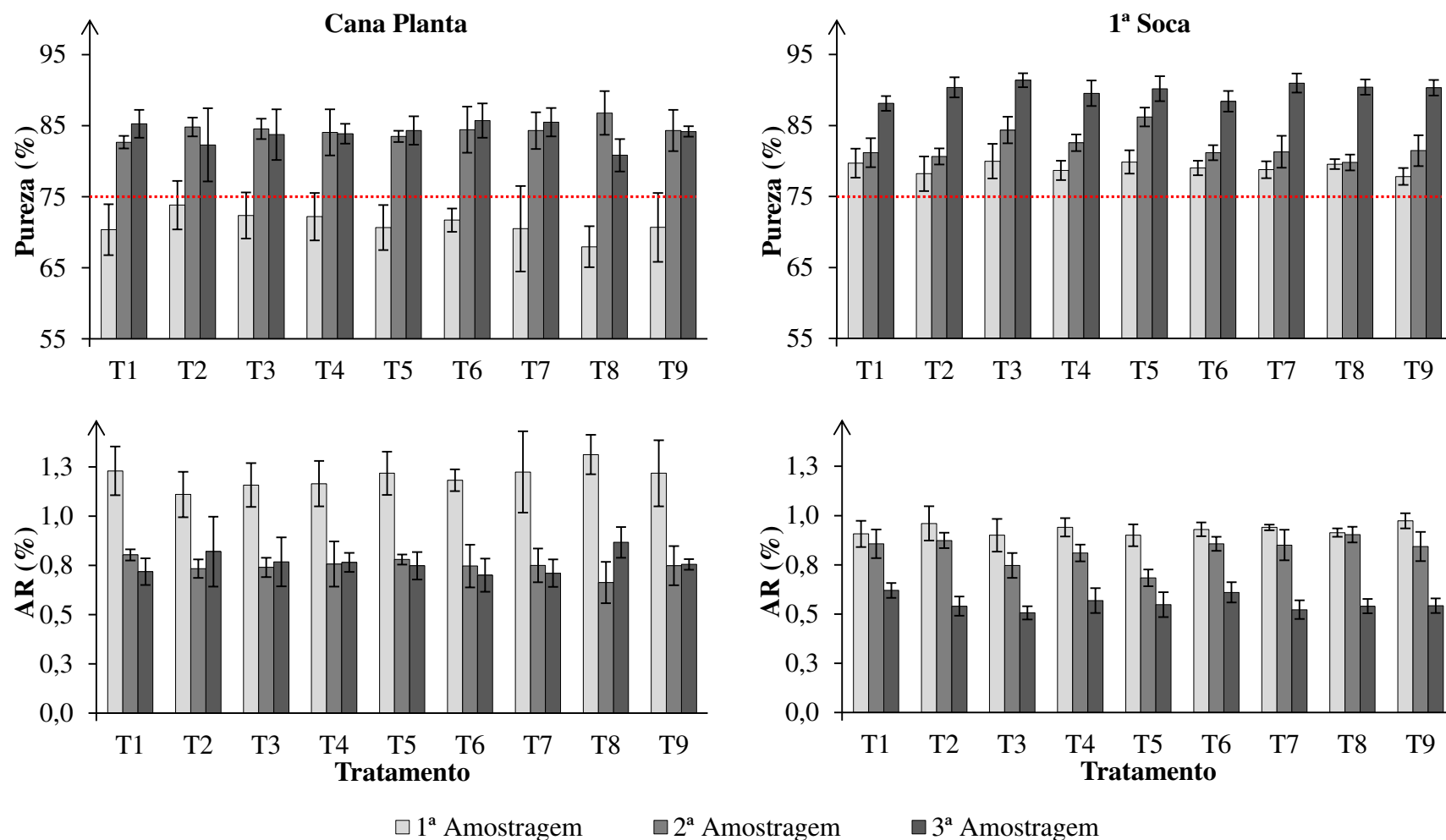


Figura 31. Resultado das análises de Pureza (Pureza aparente do caldo, %) e AR (Açúcares redutores do caldo, %) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragem, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragem, respectivamente) de cana-de-açúcar. (Onde: linha pontilhada= nível de referência segundo CONSECANA (2006); barra transversal= desvio padrão ( $\pm$ ); T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

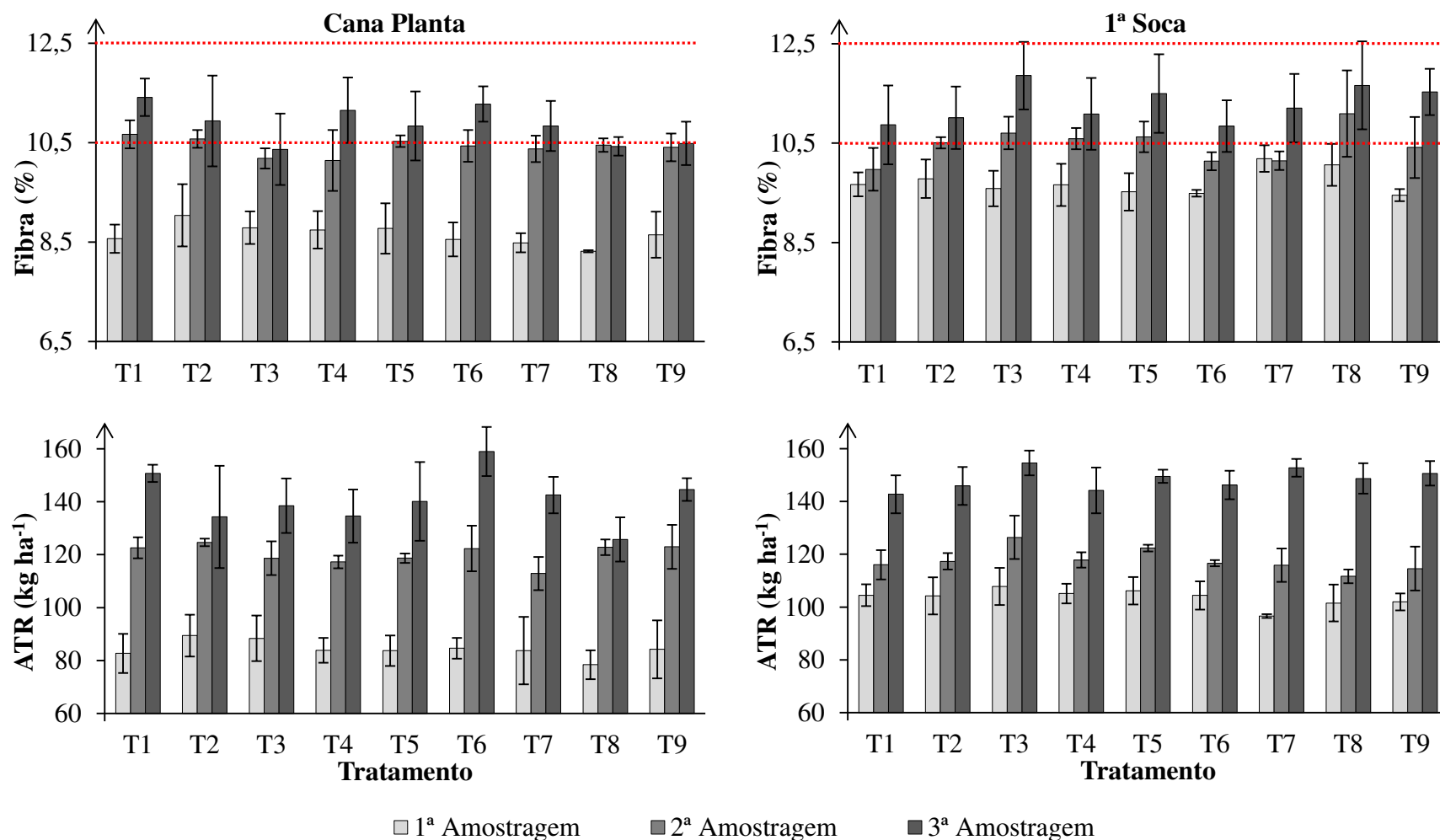


Figura 32. Resultado das análises de Fibra (Fibra da cana-de-açúcar, %) e ATR (Açúcar total recuperável, kg ha<sup>-1</sup>) na cana planta (358, 408 e 480 dias após o plantio – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) e 1ª soca (258, 281 e 348 dias após a colheita – 1ª, 2ª e 3ª amostragens, respectivamente) de cana-de-açúcar. (Onde: linha pontilhada= nível de referência segundo OLIVEIRA et al. (2009); barra transversal= desvio padrão ( $\pm$ ); T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4).

Segundo alguns limites relacionados aos atributos qualitativos indicativos de maturação da cana-de-açúcar disponíveis na literatura, os tratamentos apresentavam-se maduros e aptos a serem colhidos, exceto para os atributos Brix (T8), Pol (T2 e T8) e Fibra (T3, T8 e T9) na cana planta (Figuras 30, 31 e 32). Fernandes (2000) estabeleceu que o valor de Brix para industrialização da cana-de-açúcar é 18, ou seja, 18% de sólidos solúveis; enquanto o teor mínimo de Pol é de 14,4% para início da colheita da cultura. Já para Rodrigues (1995), o valor de Pol é de, no mínimo, 15,3%. O limite de Pureza exigido pelas normas do CONSECANA (2006) para o recebimento da cana-de-açúcar na usina é acima de 75%. Oliveira et al. (2009) recomendam teor de Fibra entre 10,5 e 12,5%, já que possibilita maior extração do caldo e o uso do bagaço para alimentação energética das caldeiras. A redução no teor de AR é proporcionada pela conversão de açúcares em sacarose, revelando avanço na maturação da cana-de-açúcar (LAVANHOLI, 2010).

Ao comparar a qualidade do caldo entre a cana planta e 1ª soca (Figuras 30, 31 e 32), observou-se melhora gradativa em todos os atributos avaliados, o que pode ter ocorrido em função dos fatores externos indesejáveis que ocorreram na cana planta, como o tombamento. O principal efeito negativo proporcionado pelo tombamento é a emergência de brotos/rebentos laterais nos colmos principais da cana-de-açúcar, que funcionam como dreno e prejudicam a qualidade final do caldo. Berding et al. (2005) observaram redução do teor de Pol e aumento de AR quando os brotos laterais eram colhidos e processados junto com a cana madura.

Não houve interação significativa entre os três fatores avaliados (profundidade do tubo gotejador, qualidade de água e fertirrigação) para estimativa de produção colmos (EPC) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR) (item 9.3, Tabela 31). De outro modo, observou-se interação entre os fatores qualidades de água e fertirrigação na cana planta (Tabela 24), sendo as maiores médias de EPC e RTR observadas nos tratamentos irrigados com ARS sem fertirrigação. A fertilidade natural do solo (Tabela 9, item 5.2) pode ter sido o fator responsável por essa diferença, visto que, segundo Staut (2006), a produção média da cana-de-açúcar nas condições do Estado de São Paulo é variável em relação à fertilidade, apresentando maiores produções em solos mais férteis.

Os valores médios obtidos para EPC e RTR em função dos tratamentos aplicados são apresentados na Tabela 25. Observou-se, na cana planta, que as médias de EPC para os tratamentos T2, T3 e T6 apresentaram-se estatisticamente iguais ao tratamento sequeiro (T1) e

menores aos demais tratamentos irrigados (T4, T5, T7, T8 e T9); com relação ao RTR, todos os tratamentos irrigados apresentaram médias estatísticas iguais (T4, T5 e T7) ou menores (T2, T3, T6 e T8) ao T1, exceto o tratamento T9 que apresentou comportamento superior aos demais. Por outro lado, a produção observada na 1ª soca revelou que todos os tratamentos irrigados apresentaram médias superiores estatisticamente quando comparados ao tratamento T1, indicando que a técnica da irrigação proporcionou aumento na produção de colmos (EPC) e melhorias na qualidade do caldo (RTR), mesmo com ocorrência de elevadas lâminas precipitadas (aproximadamente 1400 mm no decorrer da 1ª soca).

Tabela 24. Estimativa de produção de colmos de cana-de-açúcar (EPC, t ha<sup>-1</sup>) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, t ha<sup>-1</sup>) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS) e da fertirrigação (com ou sem) no ciclo da cana planta (482 dias após o plantio) em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Qualidade de água | EPC                      |           | RTR           |          |
|-------------------|--------------------------|-----------|---------------|----------|
|                   | Fertirrigação            |           | Fertirrigação |          |
|                   | Com                      | Sem       | Com           | Sem      |
| <b>EET</b>        | 197,34 aA <sup>(1)</sup> | 195,74 bA | 26,66 aA      | 27,22 bA |
| <b>ARS</b>        | 184,98 aB                | 225,86 aA | 26,05 aB      | 32,44 aA |

<sup>(1)</sup> Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Cumprе lembrar que os fatores externos mencionados anteriormente (baixas temperaturas no período da germinação; entrada de roedores; e tombamento) aliados ao atraso na instalação do experimento, resultando em pouca influência dos tratamentos no ciclo da cana planta, pode ter sido decisivo para que alguns tratamentos irrigados apresentassem médias semelhantes ao tratamento sequeiro.

Mesmo apresentando número inferior de perfilhos quando comparado aos resultados de Dalri et al. (2008), cumpre destacar a alta produtividade observada nos tratamentos irrigados e sequeiro (Tabela 25). A produção média obtida foi de 199,4 t ha<sup>-1</sup> na cana planta e de 219,3 t ha<sup>-1</sup> na 1ª soca, valores superiores à média nacional (69,4 t ha<sup>-1</sup>) e à média do Estado de São Paulo (74,8 t ha<sup>-1</sup>), observados na safra 2012/2013 (CONAB, 2013). Além de terem sido obtidos altos valores de ATR (Figura 32), principalmente na 1ª soca, os quais ultrapassaram a média nacional de 136 kg t<sup>-1</sup> (CONAB, 2013). A elevada produtividade está diretamente associada ao aumento da massa de colmo proporcionado pela irrigação (DALRI e CRUZ, 2008) e pela boa qualidade do solo (fertilidade e retenção de água) adicionado às elevadas precipitações no decorrer dos dois

anos de cultivo. Ao avaliar a produção da cana-de-açúcar submetida à irrigação com EET, Deon et al. (2010) obtiveram a máxima produção na 1ª soca com 149 t ha<sup>-1</sup> ao irrigar a cultura com 200% de sua necessidade hídrica. Dalri e Cruz (2002) observaram produtividade média de 98 t ha<sup>-1</sup> para a cultura da cana-de-açúcar no tratamento sequeiro cultivada em solo com boa fertilidade e elevada capacidade de armazenamento de água.

Tabela 25. Estimativa de produção de colmo (EPC, t ha<sup>-1</sup>) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, t ha<sup>-1</sup>) para nove tratamentos no ciclo da cana planta e 1ª soca em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Tratamento (T)    | Cana planta             |         | 1ª soca  |         |
|-------------------|-------------------------|---------|----------|---------|
|                   | EPC                     | RTR     | EPC      | RTR     |
| T1                | 187,17 b <sup>(2)</sup> | 28,19 b | 160,67 b | 22,91 b |
| T2                | 175,56 b                | 23,94 c | 236,07 a | 34,52 a |
| T3                | 183,47 b                | 25,28 c | 238,55 a | 36,76 a |
| T4                | 219,11 a                | 29,38 b | 229,42 a | 33,10 a |
| T5                | 208,01 a                | 29,16 b | 241,58 a | 36,12 a |
| T6                | 168,68 b                | 26,77 c | 221,58 a | 32,40 a |
| T7                | 214,47 a                | 30,57 b | 209,61 a | 32,06 a |
| T8                | 201,28 a                | 25,34 c | 211,53 a | 31,41 a |
| T9                | 237,25 a                | 34,32 a | 224,72 a | 33,74 a |
| Teste F para T    | 7,29*                   | 4,54*   | 3,32*    | 3,97*   |
| CV <sup>(1)</sup> | 9,33                    | 11,97   | 13,82    | 13,92   |

T1= sem irrigação; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4; <sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \*teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Em geral, os resultados obtidos demonstram que somente a irrigação ou sua associação com fertirrigação proporcionou ganhos consideráveis na produção da cana-de-açúcar quando comparado ao cultivo em sequeiro (Tabela 25), concordando com os estudos de Dalri e Cruz (2002), Dantas Neto et al. (2006), Dalri e Cruz (2008), Dalri et al. (2008), Gava et al. (2011), Andrade Jr. et al. (2012), Barbosa et al. (2012) e Quintana et al. (2012).

Mesmo que não tenha sido observada diferença estatística quando analisado o fator qualidade de água – EET e ARS (item 9.3, Tabela 31), vale destacar o desempenho dos tratamentos irrigados com EET, que aumentaram a média da EPC em 19 t ha<sup>-1</sup> quando comparado aos tratamentos irrigados com ARS na 1ª soca. Além disso, observou-se evolução na produção (EPC) e na qualidade do caldo (RTR) da cana planta para 1ª soca (depois da efetivação dos tratamentos), demonstrando que a aplicação de EET pode se tornar uma fonte alternativa para substituição de águas com melhor qualidade e, ainda, incrementar a EPC e o RTR da cana-de-



açúcar, sempre considerando os aspectos ambientais relacionados ao uso de água residuária. De forma idêntica ao observado na presente pesquisa, o emprego de EET como água de irrigação vem sendo avaliado e comprovado como fonte de água e nutrientes para irrigação da cana-de-açúcar em diversos estudos, como: Blum et al. (2009), Leal et al. (2009a), Deon et al. (2010), Blum et al. (2012), Freitas et al. (2013).

Além dos benefícios econômicos obtidos pela alta produtividade da cana irrigada com EET, salienta-se que a maior extração de nutrientes pela planta e posterior exportação do campo para as indústrias minimizam as perdas de nutrientes para o ambiente e os possíveis danos ambientais, possibilitando considerar o solo como alternativa para disposição de EET. Contudo, dois anos de experimentação são insuficientes para concluir se a aplicação de EET continuará proporcionando um bom desenvolvimento qualitativo e quantitativo para os próximos ciclos da cana-de-açúcar. Portanto, estudos considerando o sistema solo-planta em longo prazo são necessários para conhecer os reais benefícios do uso de EET como fonte de água de irrigação.

## 7. CONCLUSÕES

- O uso de efluente de esgoto tratado como fonte hídrica na irrigação elevou a produtividade e melhorou a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar em relação ao tratamento sem irrigação, apresentando-se sustentável agronomicamente na condição edafoclimática avaliada;
- A instalação do tubo gotejador a 0,2 m de profundidade disponibilizou água na região de maior desenvolvimento radicular e reduziu as perdas de água por evaporação e por percolação profunda;
- Para o manejo da irrigação subsuperficial por balanço de água no solo, diferentes camadas no perfil do solo devem ser consideradas para o cálculo da lâmina de irrigação, tomando-se como referência a profundidade de instalação do tubo gotejador.
- Não houve alteração na classificação do solo quanto aos parâmetros sódico-salinos e as propriedades físicas não foram influenciadas pela aplicação de efluente de esgoto tratado no decorrer dos ciclos avaliados; e
- A aplicação de efluente de esgoto tratado e a profundidade de instalação do tubo gotejador não alteraram significativamente o comprimento radicular da cana-de-açúcar.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDI-KOUPAI, J.; MOSTAFAZADEH-FARD, B.; AFYUNI, M.; BAGHERI, M. R. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. **Plant, Soil and Environment**, v. 52, n. 8, p. 335-344, 2006.
- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **Norma técnica NBR 13969, de 30 de outubro de 1997**. Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro-RJ: ABNT, 1997. 60p.
- ABROL, I. P.; YADAV, J. S. P.; MASSOUD, F. I. **Salt-Affected Soils and their Management**. Rome: FAO, 1988. 143p. (FAO. Soils Bulletin, 39).
- ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. **Revista da Saúde Pública**, v. 32, n. 2, p. 160-165, 1998.
- ALAM, M., T. P. TROOIEN, D. H. ROGERS, AND T. J. DUMLER. An efficient irrigation technology for alfalfa growers. **Journal of Extension**, v. 40, n.3, p. 1-9, 2002.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVAREZ, I. A.; CASTRO, P. R. C.; NOGUEIRA, M. C. S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.
- ALVES, W. W. A.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; MATOS, J. A.; SILVA, S. S. Análise geoestatística da distribuição de água no solo, aplicada por sistema de irrigação por microaspersão. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 2, p. 143-151, 2011.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Conjuntura de recursos hídricos no Brasil: Informe 2012**, ed. especial, Brasília-DF: ANA, 2012. 215p.
- ANDRADE JR., A. S.; BASTOS, E. A; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 76-84, 2012.
- ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. **Métodos de Irrigação e Quimigação**. Sete Lagoas-MG: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006, 17p. (Circular técnico, 86).
- ANDRADE, C. L. T.; COSTA, É. L.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 173-176, 2003.
- ANDRADE, E. M.; D'ALMEIDA, D. M. B. A.; MEIRELES, A. C. M.; LEMOS FILHO, L. C. A.; ARRUDA, F. E. R. Evolução da concentração iônica da solução do solo em áreas irrigadas na Chapada do Apodi, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 35, n. 1, p. 9-16, 2004.
- ANDRADE, I. P.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. A. A.; FREIRE, M. B. G. S.; SANTOS, T. E. M. Impacto do reuso de efluentes de esgoto no lixiviado de solos cultivados com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, (Suplemento), p. 212-216, 2005.
- APHA (American Public Health Association). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22<sup>a</sup> ed., Washington: APHA/AWWA/WPCF, 2012. 1496p.

- AVILÁN, L. R.; GRANADOS, F. M.; YÉPEZ, W. T.; RINCONES, C.; BLANCO, F. Estudio del sistema radicular de la caña de azúcar variedad V58-4 en un Mollisol del Estado Portuguesa. **Agronomia Tropical**, v. 28, n. 2, p. 163-174, 1978.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D.W. **Water Quality for agriculture**. 3ª ed., Rome: FAO, 1994. 174p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 29).
- AZEVEDO, L. P.; OLIVEIRA, E. L. Efeitos da aplicação de efluente de tratamento de esgoto na fertilidade do solo e produtividade de pepino sob irrigação subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 253-263, 2005.
- BALKS, M. R.; BOND, W. J.; SMITH, C. J. Effects of sodium accumulation on soil physical properties under an effluent-irrigated plantation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 36, p. 821-830, 1998.
- BARBOSA, E. A. A. ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 588-594, 2013.
- BARBOSA, E. A. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 952-958, 2012.
- BARBOSA, M. H. P.; SILVEIRA, L. C. I.; OLIVEIRA, M. W.; SOUZA, V. F. M.; RIBEIRO, S. N. N. RB867515 Sugarcane cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 1, n. 4, p. 437-438, 2001.
- BARRETO FILHO, A. A.; DANTAS NETO, J.; MATOS, J. A.; GOMES, E. M. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão, instalado a nível de campo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 309-314, 2000.
- BARRETO, C. V. G.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, E. A. Efeito da profundidade e espaçamento de instalação de gotejadores no potencial hídrico das folhas de cafeeiro em solo argiloso. **Coffee Science**, v. 4, n. 2, p. 114-125, 2009.
- BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 700-707, 2009.
- BARTH, F. T. **Modelos para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo-SP: Nobel/ABRH, 1987. 525p.
- BEAUCLAIR, E. G. F.; SCAPARI, M. S. Noções fitoténicas. In: RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte**. 2ª ed., Piracicaba-SP: TCC Ripoli, p. 65-73, 2007.
- BERDING, N.; HURNEY, A. P.; SALTER, B.; BONNETT, G. D. Agronomic impact of sucker development in sugarcane under different environmental conditions. **Field Crops Research**, v. 92, p. 203-217, 2005.

- BERNARDI, C. C. **Reuso de água para irrigação**. 2003. 52p. Monografia Lato sensu (Pós-graduação em Gestão Sustentável da Agricultura Irrigada). Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2003.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8º ed., Viçosa-MG: UFV, 2008. 625p.
- BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reuso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, p. 152-169, 2008.
- BLUM, J.; LEAL, R. M. P.; MONTES, C. R.; MELFI, A. J. Influência do manejo na sustentabilidade do uso agrícola de efluentes: estudo de caso com cana-de-açúcar em Lins-SP. **Revista DAE**, n. 180, p. 61-66, 2009.
- BLUM, J.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado, em área com aplicação de fosfogesso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 593-602, 2012.
- BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. 3ª ed., New York: J. Wiley & Sons, 2001, 320p.
- BOND, W. J. Effluent irrigation - an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, v. 36, n. 4, p. 543-555, 1998.
- BRAGG, P. L.; GOVI, G.; CANNELL, R. Q. A comparison of methods, including angled and vertical minirhizotrons, for studying root growth and distribution in a spring oat crop. **Plant and Soil**, v. 73, p. 435-440, 1983.
- BRASIL, F. C.; ZONTA, E.; OLIVEIRA, M. R. G. Métodos de amostragem e quantificação para estudos do sistema radicular em condições de campo – uma revisão crítica. **Revista Universidade Rural: Série Ciências da Vida**, v. 27 n. 2, p. 14-33, 2007.
- BRYLA, D. R.; BAÑUELOS, G. S.; MITCHELL, J. P. Water requirements of subsurface drip-irrigated faba bean in California. **Irrigation Science**, v. 22, p. 31-37, 2003.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas-SP: Instituto Agronômico, 2009. 77p. (Boletim técnico, 106)
- CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: A review. **American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, v. 41, n. 5, p. 1353-1367, 1998.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 1529-1534, 2007.
- CARARO, D. C.; BOTREL, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 336-345, 2007.
- CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agronômico, 2010, 882p.

CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura). **Clima de Campinas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-de-campinas.html>>. Acesso em: 11 nov. 2013.

CERQUEIRA, L. L.; FADIGAS, F. S.; PEREIRA, F. A.; GLOAGUEN, T. V.; COSTA, J. A. Desenvolvimento de *Heliconia psittacorum* e *Gladiolus hortulanus* irrigados com águas residuárias tratadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 606-613, 2008.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Aplicação de água de reuso de ETE na agricultura: Orientação para apresentação de projeto visando a aplicação de água de reuso proveniente de estação de tratamento de esgoto doméstico na agricultura**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/publicacoes-e-relatorios/1-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: 07 jan. 2014.

CHENG, W.; COLEMAN, D. C.; BOX JR., J. E. Measuring root turnover using the minirhizotron technique. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 34, p. 261-267, 1991.

CICHOTA, R.; VAN LIER, Q. J. Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 72-78, 2004.

CID BIO-SCIENCE. **CI-690 RootSnap! Operations Manual**. Washington: CID, 2011, 24p.

CID BIO-SCIENCE. **In-Situ Root Imager CI-600 Instruction Manual**. Washington: CID, 2010, 35p.

CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). **Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010**. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH no 54, de 28 de novembro de 2005. Brasília, DF, 2010. 2p.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 475-480, 2005.

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; LEDO, C. A. S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 23-30, 2006.

COELHO, E. R.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, v. 39, n. 6, p. 2007-2016, 1996.

COELHO, E. R.; OR, D. Modelo de distribuição de água e de potencial matricial no solo sob gotejamento com extração de água por raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 225-234, 1999.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar 2012/2013**. 4ª levantamento (abril/2013), Brasília-DF: CONAB, 2013, 16p.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu

enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília-DF, 2005. 23p.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília-DF, 2011. 8p.

CONSECANA (Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo). **Manual de instruções**. 5ª ed., Piracicaba-SP: CONSECANA, 2006, 111p.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Efeito da frequência de irrigação subsuperficial por gotejamento no desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Irriga**, v. 7, n. 1, p. 29-34, 2002.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 516-524, 2008.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2008.

DALTON, F. N.; VAN GENUCHTEN, M. TH. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. **Geoderma**, v. 38, p. 237-250, 1986.

DANNOURA, M.; KOMINAMI, Y.; OGUMA, H.; KANAZAWA, Y. The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. **Plant Root**, v. 2, p. 14-18, 2008.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

DANTAS, D. L.; SALES, A. W. C. Aspectos Ambientais, Sociais e Jurídicos do Reuso da Água. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 4-19, 2009.

DEON, M. D.; GOMES, T. M.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; SILVA, E. Produtividade e qualidade da cana-de-açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 10, p. 1149-1156, 2010.

DEVASIRVATHAM, V. **A Review of Subsurface Drip Irrigation in Vegetable Production**. Sydney: University of Western Sydney, 2009, 35p. (Irrigation Matters Series nº 03/09)

DILUSTRO, J. J.; DAY, F. P.; DRAKE, B. G.; HINKLE, C. R. Abundance, production and mortality of fine roots under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> in an oak-scrub ecosystem. **Environmental and Experimental Botany**, n. 48, p. 149-159, 2002.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agrícola**, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.

ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S.; SOUSA, A. C. M.; MATSURA, E. E. Application of treated domestic sewage in the soil for design the subsurface drip irrigation. In: International Conference on Agricultural Engineering, 2012, Valencia-Spain. **Anais...** Valencia-Spain: CIGR-AgEng, 2012. p. 1-6.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual de Métodos de Análise do Solo**. 2ª ed., Rio de Janeiro-RJ: EMBRAPA Solos, 1997. 212p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Manual Técnico de Coleta, Acondicionamento, Preservação e Análises Laboratoriais de Amostras de Água para fins Agrícolas e Ambientais**. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2004. 97p. (Embrapa solo. Documento nº 65).

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2ª ed., Rio de Janeiro-RJ: EMBRAPA Solos, 2006. 306p.

FARIA, L. F.; COELHO, R. D.; RESENDE, R. S. Variação de vazão de gotejadores de fluxo normal enterrados na irrigação de café. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 589-602, 2004.

FARIAS, C. H. A.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

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

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba-SP: STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos, 2000. 193p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FIGUEIREDO, P. Breve histórico da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agrônomo, 2010, 882p.

FONSECA, A. F. **Disponibilidade de nitrogênio, alterações nas características químicas do solo e do milho pela aplicação de efluente de esgoto tratado**. 2001. 110f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2001.

FONSECA, A. F.; HERPIN, U.; PAULA, A. M.; VICTÓRIA, R. L.; MELFI, A. J. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 64, n. 2, p. 194-209, 2007.

FRANCO, E. M. **Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução**. 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2009.

FREITAS, C. A. S.; SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; MOTA, F. S. B.; GONÇALVES, L. R. B.; BARROS, E. M. Efluente de esgoto doméstico tratado e reutilizado como fonte hídrica alternativa para a produção de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 727-734, 2013.

FRIZZONE, J. A.; MATIOLI, C. S.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A. Viabilidade econômica da irrigação suplementar da cana-de-açúcar, *Saccharum* spp., para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 5, p. 1131-1137, 2001.



FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A.; HELBEL JÚNIOR, C. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 414-425, 2007.

GAVA, G. J. C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 250-255, 2011.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample Time Domain Reflectometry. Improved analysis of the step response waveform. **Advances in Molecular Relaxation Process**, v. 7, n. 1, p. 45-59, 1975.

GLOAGUEN, T. V.; FORTI, M. C.; YVES, L.; MONTES, C. R.; GONÇALVES, R. A. B.; HERPIN, U.; MELFI, A. J. Soil solution chemistry of a Brazilian Oxisol irrigated with treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, v. 88, p.119-131, 2007.

GOMES, T. M.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; SILVA, E.; SUNDEFELD JÚNIOR, G. C.; DEON, M. D.; PIVELI, R. P. Aporte de nutrientes e estado nutricional da cana-de-açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto com e sem desinfecção. **Revista DAE**, n. 180, p. 19-25, 2009.

GONÇALVES, A. C. A. **Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação**. 1997. 118f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba-SP, 1997.

GONÇALVES, R. A. B.; GLOAGUEN, T. V.; FOLEGATTI, M. V.; LIBARDI, P. L.; LUCAS, Y.; MONTES, C. R. Pore size distribution in soils irrigated with sodic water and wastewater. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 701-707, 2010.

HAAG, H. P.; DECHEN, A. R.; CARMELLO, Q. A. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar, cultivo e utilização**. Campinas-SP: Fundação Cargill, v. 1, p. 88-162, 1987.

HALLIWELL, D. J.; BARLOW, K. M.; NASH, D. M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, p. 1259-1267, 2001.

HANSON, B.; MAY, D. **Drip Irrigation Salinity Management for Row Crops**. University of California: Agriculture and Natural Resources, 2011. 13p. (Communication Services, Publication 8447).

HIMMELBAUER, M. L.; LOISKANDL, W.; KASTANEK, F. Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems. **Plant and Soil**, v. 260, p. 111-120, 2004.

HOFFMANN, H. P.; SANTOS, E. G. D.; BASSINELLO, A. I.; VIEIRA, M. A. S. **Variedades RB de Cana-de-açúcar**. Araras-SP: Departamento de Biotecnologia Vegetal da UFSCar, 2008, 30p.

HOLANDA, J. S.; VITTI, G. C.; SALVIANO, A. A. C.; MEDEIROS, J. D. F.; AMORIM, J. R. A. Alterações nas propriedades químicas de um solo aluvial salino-sódico decorrentes da

subsolagem e do uso de condicionadores. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 387-394, 1998.

INFORZATO, R. ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar Var. Co. 290, em solo tipo Terra Roxa Legítima. **Bragantia**, v. 16, n. 1, p. 1-13, 1957.

JOHNSON, M. G.; TINGEY, D. T.; PHILLIPS, D. L.; STORM, M. J. Advancing fine root research with minirhizotrons. **Environmental and Experimental Botany**, v. 45, p. 263-289, 2001.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KAMARA, L.; ZARTMAN, R.; RAMSEY, R. H. Cotton-root distribution as a function of trickle irrigation emitter depth. **Irrigation Science**, v. 12, p. 141-144, 1991.

LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, p. 351-360, 2009.

LAMM, F. R.; CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.) **Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management**. 13ª ed., Amsterdam: Elsevier, 2007, 618p.

LAMM, F. R.; KHEIRA, A. A. A.; TROOIEN, T. P. Sunflower, soybean, and grain sorghum crop production as affected by dripline depth. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 26, n. 5, p. 873-882, 2010.

LAMM, F. R.; TROOIEN, T. P. Dripline depth effects on corn production when crop establishment is nonlimiting. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 835-840, 2005.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agrônômico, 2010, 882p.

LEAL, R. M. P.; FIRME, L. P.; MONTES, C. R.; MELFI, A. J.; PIEDADE, S. M. S. Soil exchangeable cations, sugarcane production and nutrient uptake after wastewater irrigation. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 2, p. 242-249, 2009a.

LEAL, R. M. P.; HERPIN, U.; FONSECA, A. F.; FIRME, L. P.; MONTES, C. R.; MELPI, A. J. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 307-316, 2009b.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos hídricos no Brasil e no mundo**. Embrapa Cerrados, Planaltina-DF, 2001, 46p. (Documento 33).

LINSENMEIER, A.; LEHNART, R.; LÖHNERTZ, O.; MICHEL, H. Investigation of grapevine root distribution by in situ minirhizotron observation. **Vitis**, v. 49, n. 1, p. 1-6, 2010.

LUCENA, A. M. A.; GUERRA, H. O. C.; CHAVES, L. H. G.; COSTA, F. X. Análise de um efluente de esgoto tratado e seu efeito em propriedades químicas de um neossolo quartzarênico. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 4, p. 409-414, 2006.

- MACHADO, R. M. A.; OLIVEIRA, M. R. G. Efeito da profundidade de colocação do tubo de rega gota-a-gota na uniformidade de rega e na eficiência do uso da água em tomate de indústria. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 30, n. 1, p. 162-171, 2007.
- MACHADO, R. M. A.; OLIVEIRA, M. R. G. Tomato root distribution, yield and fruit quality under different subsurface drip irrigation regimes and depths. **Irrigation Science**, v. 24, p. 15-24, 2005.
- MALICKI, M. A.; PLAGGE, R.; ROTH, C. H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 357-366, 1996.
- MAROUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Profundidade de instalação da linha de gotejadores em tomateiro para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 206-210, 2002.
- MARQUES, P. A. A.; MARQUES, T. A.; FRIZZONE, J. A. Viabilidade econômica sob condições de risco para a irrigação da cana-de-açúcar na região de Piracicaba-SP. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 55-65, 2006.
- MELO, L. C. A.; SILVA, C. A.; DIAS, B. O. Caracterização da matriz orgânica de resíduos de origens diversificadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 101-110, 2008.
- MELO, R. F.; TEIXEIRA, M. B.; GRUBER, Y. B. G.; COELHO, R. D. Intrusão de raízes de eucalipto em gotejadores enterrados. **Irriga**, v. 15, n. 3, p. 282-300, 2010.
- MOJID, M. A.; WYSEURE, G. C. L. Implications of municipal wastewater irrigation on soil health from a study in Bangladesh. **Soil Use and Management**, v. 29, p. 384-396, 2013.
- MONTEIRO, A. L. N.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G.; SANTOS, F. X. Avaliação de lavagem parcial de sais em neossolo flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 2, p. 207-220, 2009.
- MONTEIRO, R. O. C.; COELHO, R. D.; MELO, P. C. T.; FERRAZ, P.; CHAVES, S. W. P.; SHIRAHIGE, F. H.; BELTRAME NETO, E.; PIEDADE, S. M. S. Net melon performance as affected by the drip irrigation depth and mulching. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 4, p. 447-451, 2008.
- MORUGÁN-CORONADO, A.; GARCÍA-ORENES, F.; MATAIX-SOLERA, J.; ARCENEGUI, V.; MATAIX-BENEYTO, J. Short-term effects of treated wastewater irrigation on Mediterranean calcareous soil. **Soil & Tillage Research**, v. 112, p. 18-26, 2011.
- NAKAYAMA, E. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, v. 12, p. 187-192, 1991.
- NAKAYAMA, F. S.; BOMAN, B. J.; PITTS, D. J. Maintenance. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.) **Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management**. 13<sup>a</sup> ed., Amsterdam: Elsevier, 2007, 618p.
- NETAFIM. **Tubo gotejador integral autocompensado, DripNet PC™ AS**. Disponível em: <<http://www.netafim.com.br/product/dripnet-pc-as-thick-walled-dripperlines>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; CONSOLI, M. PIB do setor sucroenergético, de US\$ 28 bi, é quase 2% da riqueza nacional. In: SOUSA, E. L.; MACEDO, I. C. **Etanol e bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. São Paulo-SP: UNICA, 2009, 47p.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, p. 213-237, 2001.
- OLIVEIRA, E. L.; ANDRADE, L. A. B.; FARIA, M. A.; EVANGELISTA, A. W. P.; MORAIS, A. R. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 11, p. 1398-1403, 2009.
- ORON, G.; DEMALACH, Y.; GILLERMAN, L.; DAVID, I.; RAO, V. P. Improved saline-water use under subsurface drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 39, p. 19-33, 1999.
- ORON, G.; DEMALACH, Y.; HOFFMAN, Z.; MANOR, Y. Effluent reuse by trickle irrigation. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 9, p. 103-8, 1991.
- OTTO, S. R. L.; ALCAIDE, M. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 265-269, 2001.
- PATEL, N.; RAJPUT, T. B. S. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. **Agricultural Water Management**, v. 88, p. 209-223, 2007.
- PATEÑA, G.; INGRAM, K. T. Digital Acquisition and Measurement of Peanut Root Minirhizotron Images. **Agronomy Journal**, v. 92, p. 541-544, 2000.
- PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, n. 3, p. 175-206, 2002.
- PESCOD, M. B. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: FAO, 1992. 125p. (Irrigation and Drainage Paper, 47).
- PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Irrigação e drenagem. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agrônomo, 2010, 882p.
- PLETSCH, T. A. **Desempenho de gotejadores com uso de efluente de esgoto doméstico tratado**. 2008. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu-SP, 2008.
- PRADO, R. M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: Revisão de literatura. **Revista biociências**, v. 9, n. 3, p. 7-16, 2003.
- PREVEDELLO, C. L.; MAGGIOTTO, S. R.; LOYOLA, J. M. T.; DIAS, N. L.; BEPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1-8, 2007.
- PROCANA. **Números do setor sucroenergético (Safrá 2012/13)**, 10 fev. 2012. Disponível em: <<http://www.jornalcana.com.br/numeros-do-setor-sucroenergetico/>>. Acesso em: 21 mar. 2014.
- PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; ELBANA, M.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; LAMM, F. R. Effect of flushing frequency on emitter

clogging in microirrigation with effluents. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 6, p. 883-891, 2010.

QUINTANA, K. A.; ZANINI, J. R.; SILVA, E. R. Irrigação e fertirrigação por gotejamento em cana-de-açúcar na presença e ausência de boro. **Científica**, v. 40, n. 2, p. 103-116, 2012.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v. 13, v. 3, p. 129-139, 1992

RESENDE, R. S.; COELHO, R. D.; LEAL, M. L. S.; MATA, S. S. Suscetibilidade à intrusão radicular de gotejadores convencionais na irrigação subsuperficial de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 9, n. 2, p. 150-165, 2004.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **The use of saline waters for crop production**. Rome: FAO, 1992. 133p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 48).

RICHARDS, L. A. (Ed). **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory Staff, United States Department of Agriculture, 1954. 160p. (Agriculture Handbook, 60).

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: Estado da arte**. 1ª ed., Piracicaba-SP: TCC Ripoli, 2006, 216p.

ROBINSON, D. A.; BELL, J. P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron minerals on the determination of soil water content using dielectric techniques. **Journal of Hydrology**, v. 161, p. 169-180, 1994.

ROBINSON, D. A.; JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR, D.; FRIEDMAN, S. P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 4, p. 444-475, 2003.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu-SP: UNESP, 1995, 99p.

ROQUE, M. W. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo cultivado com feijão irrigado submetido a diferentes sistemas de preparo**. 2007. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2007.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agrônômico, 2010, 882p.

RYTTER, R. M.; HANSSON, A. C. Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. **Biomass and Bioenergy**, v. 11, n. 2/3, p. 129-137, 1996.

SANDRI, D. **Irrigação da cultura da alface com água residuária tratada com leitos cultivados com macrófita**. 2003. 186f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Alteração química do solo irrigado por aspersão, gotejamento subterrâneo e superficial com água residuária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 755-765, 2009.

SANDRI, D.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Teores de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 45-57, 2006.

SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; LAVRES JÚNIOR, J. **O sistema minirhizotron no estudo da dinâmica de raízes**. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados, 2007, 24p. (Circular técnico, 203).

SANTOS, D. **Distribuição do sistema radicular e produtividade de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) fertirrigada por gotejamento subsuperficial**. 2010. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu-SP, 2010.

SANTOS, M. A. L.; FRIZZONE, J. A. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) colhida no mês de janeiro: um modelo de análise de decisão para o litoral sul do estado de Alagoas. **Irriga**, v. 11, n. 3, p. 339-355, 2006.

SÃO PAULO (ESTADO). **Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976**. Regulamento da lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. São Paulo-SP, 1976.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agronômico, 2010, 882p.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C.M. (Ed.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba-SP, 2006, 415p.

SHALHEVET, J. Using water of marginal quality for crop production: major issues. **Agricultural Water Management**, v. 25, p. 233-269, 1994.

SILVA, C. T. S.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V.; DANTAS NETO, J.; CARVALHO, C. M.; GOMES FILHO, R. R. Crescimento da cana-de-açúcar com e sem irrigação complementar sob diferentes níveis de adubação de cobertura nitrogenada e potássica. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 3, n. 1, p. 3-12, 2009.

SILVA, M. A.; GAVA, G. J. C.; CAPUTO, M. M.; PINCELLI, R. P.; JERÔNIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S. Uso de reguladores de crescimento como potencializadores do perfilhamento e da produtividade em cana-soca. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 545-552, 2007.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CAMARGO, M. B. P. Variabilidade espacial do armazenamento e perda média diária de água pelo solo no sistema de semeadura direta em Campinas, SP. **Bragantia**, v. 67, n.1, p. 213-223, 2008.

SONON, L. S.; SAHA, U.; KISSEL, D. E. **Soil Salinity: Testing, Data Interpretation and Recommendations**. Georgia: The University of Georgia Cooperative Extension, 2012. 6p. (Agricultural and Environmental Services Laboratories, Circular 1019)

SOUSA, A. C. M.; MATSURA, E. E.; ELAIUY, M. L. C.; SANTOS, L. N. S.; MONTES, C. R.; PIRES, R. C. M. Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, p. 647-657, 2013.

- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n.1, p. 7-15, 2004.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Multi-wire time domain reflectometry (TDR) probe with electrical impedance discontinuities for measuring water content distribution. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 3, p. 205-216, 2003.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO, E. F.; OR, D. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, v. 11, n. 1, p. 12-25, 2006.
- SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Experiência do Laboratório de Irrigação e Drenagem da Faculdade de Engenharia Agrícola/Unicamp no uso da técnica de TDR. In: MATSURA, E. E. (Org.). **Aplicações da Técnica de TDR na Agricultura**. 1ª ed. Campinas-SP: Biblioteca da Área de Engenharia (BAE), Universidade Estadual de Campinas, 2001, 178p.
- SOUZA, E. A.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1161-1166, 2007.
- SOUZA, J. A. A.; BATISTA, R. O.; RAMOS, M. M.; SOARES, A. A. Alteração nas características físicas do solo decorrentes da aplicação de esgoto doméstico tratado. **Acta Scientiarum Technology**, v. 32, n. 4, p. 361-366, 2010.
- STAUT, L. A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar**. 2006. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_2/CanaSolo/index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm)>. Acesso em: 13 jan. 2013.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 229-235, 1991.
- SUMMER, M. E. Sodic soils: New perspectives. **Australian Journal of Soil Research**, v. 31, p. 683-750, 1993.
- TASSO JÚNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; FRANCO, A.; NOGUEIRA, G. A.; NOBILE, F. O.; CAMIOTTI, F.; SILVA, A. R. Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 276-283, 2007.
- TEIXEIRA, W. G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J. D.; HUWE, B. Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 575-582, 2003.
- TILLMAN, R. W.; SURAPANENI, A. Some soil-related issues in the disposal of effluent on land. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 42, p. 225-235, 2002.
- TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

- TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. **Water Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 574-582, 1980.
- TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.
- TROOIEN, T. P.; HILLS, D. J. Application of biological effluent. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. (Ed.) **Microirrigation for Crop Production. Design, Operation, and Management**. 13ª ed., Amsterdam: Elsevier, 2007, 618p.
- TURRAL, H.; BURKE, J.; FAURÈS, J. M. **Climate change, water and food security**. Roma: FAO, 2011. 174p. (FAO. Water Reports, 36).
- TZANAKAKIS, V. A.; PARANYCHIANAKIS, N. V.; LONDRA, P. A.; ANGELAKISA, A. N. Effluent application to the land: Changes in soil properties and treatment potential. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 1757-1764, 2011.
- USDA (United States Department of Agriculture). **Soil survey manual**. Washington: Natural Resources Conservation Service Soils, 1993. 473p. (Handbook, 18)
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Test Methods**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/index.htm>>. Acesso em: 25 abr. 2013.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VAN GINNEKEN, M.; ORON, G. Risk assessment of consuming agricultural products irrigated with reclaimed wastewater: An exposure model. **Water Resources Research**, v. 36, n. 9, p. 2691-2699, 2000.
- VARALLO, A. C. T.; CARVALHO, L.; SANTORO, B. L.; SOUZA, C. F. Alterações nos atributos de um Latossolo Vermelho-amarelo irrigado com água de reuso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 372-377, 2010.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. 1ª ed., 1ª reimpressão, Campinas-SP: Instituto Agrônomo, 2010, 882p.
- VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 849-858, 2003.
- VASCONCELOS, A. C. M.; DINARDO-MIRANDA, L. L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematoides**. 2ª ed., Campinas-SP: Adonis, 2011, 83p.
- VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. **Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar**. Potafos: encarte técnico, 2005, 5p. (Informações agrônômicas nº 110)
- VERONEZ, A. H. **Irrigação de eucalipto com efluente sanitário de lagoa facultativa: eficiência do sistema soloplanta no pós-tratamento**. 2009. 129f. Dissertação (Mestrado em



Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2009.

VIEIRA, S. R.; GARCIA, M. A. G.; GONZÁLEZ, A. P.; SIQUEIRA, G. M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 181-190, 2010.

WALLANDER, H.; EKBLAD, A.; GODBOLD, D. L.; JOHNSON, D.; BAHR, A.; BALDRIAN, P.; BJÖRK, R. G.; KIELISZEWSKA-ROKICKA, B.; KJØLLER, R.; KRAIGHER, H.; PLASSARD, C.; RUDAWSKA, M. Evaluation of methods to estimate production, biomass and turnover of ectomycorrhizal mycelium in forests soils – A review. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 57, p. 1034-1047, 2013.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society Agronomy**, v. 28, p. 337-351, 1936.

ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: wetlands - construídos utilizando brita e bambu como suporte**. 2008. 189f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2008.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Fertirrigação mensal: cana planta e 1ª soca

Tabela 26. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Efluente de Esgoto Tratado (EET) no ciclo da cana planta, Campinas-SP.

| Mês/ano     | (Continua)                              |                   |                                                                     |       |                                         |       |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
|             | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|             | EET <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | EET                                                                 | FM    | EET                                     | FM    | EET                      | FM   | EET                                                  | FM   | EET                                     | FM   |
|             | ----- T2 -----                          |                   |                                                                     |       |                                         |       | ----- T3 -----           |      |                                                      |      |                                         |      |
| Mai/11      | - <sup>(5)</sup>                        | 0,26              | -                                                                   | 0,37  | -                                       | 0,15  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jun/11      | -                                       | 0,32              | -                                                                   | 3,38  | -                                       | 2,90  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jul/11      | -                                       | 1,09              | -                                                                   | 1,88  | -                                       | 4,14  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Ago/11      | -                                       | 1,74              | -                                                                   | 1,58  | -                                       | 5,17  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Set/11      | -                                       | 2,26              | -                                                                   | 2,20  | -                                       | 6,00  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Out/11      | -                                       | 2,66              | -                                                                   | 3,49  | -                                       | 6,62  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Nov/11      | -                                       | 2,94              | -                                                                   | 5,17  | -                                       | 7,03  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Dez/11      | -                                       | 3,09              | -                                                                   | 6,99  | -                                       | 7,24  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jan/12      | -                                       | 3,11              | -                                                                   | 8,66  | -                                       | 7,24  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Fev/12      | -                                       | 3,01              | -                                                                   | 9,93  | -                                       | 7,04  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Mar/12      | 21,73                                   | 2,79              | 2,62                                                                | 10,52 | 8,80                                    | 6,63  | 18,43                    | 0,00 | 2,22                                                 | 0,00 | 7,46                                    | 0,00 |
| Abr/12      | 14,60                                   | 2,45              | 1,76                                                                | 10,18 | 5,91                                    | 6,02  | 11,78                    | 0,00 | 1,42                                                 | 0,00 | 4,77                                    | 0,00 |
| Mai/12      | 13,25                                   | 1,98              | 1,59                                                                | 8,64  | 5,36                                    | 5,20  | 11,23                    | 0,00 | 1,35                                                 | 0,00 | 4,55                                    | 0,00 |
| Jun/12      | 5,95                                    | 1,38              | 0,72                                                                | 5,62  | 2,41                                    | 4,17  | 3,88                     | 0,00 | 0,47                                                 | 0,00 | 1,57                                    | 0,00 |
| Total       | 55,53                                   | 29,08             | 6,68                                                                | 78,61 | 22,48                                   | 75,55 | 45,32                    | 0,00 | 5,46                                                 | 0,00 | 18,34                                   | 0,00 |
| Total geral | 84,61                                   |                   | 85,29                                                               |       | 98,03                                   |       | 45,32                    |      | 5,46                                                 |      | 18,34                                   |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pelo Efluente de Esgoto Tratado – EET; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizante mineral – FM; (-) Mês sem eventos de irrigação subsuperficial; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4.

Tabela 26. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Efluente de Esgoto Tratado (EET) no ciclo da cana planta, Campinas-SP.

| (Conclusão)    |                                         |                   |                                                                     |       |                                         |                |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|----------------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
| Mês/ano        | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |                | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|                | EET <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | EET                                                                 | FM    | EET                                     | FM             | EET                      | FM   | EET                                                  | FM   | EET                                     | FM   |
| ----- T4 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         | ----- T5 ----- |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
| Mai/11         | - <sup>(5)</sup>                        | 0,26              | -                                                                   | 0,37  | -                                       | 0,15           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jun/11         | -                                       | 0,32              | -                                                                   | 3,38  | -                                       | 2,90           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jul/11         | -                                       | 1,09              | -                                                                   | 1,88  | -                                       | 4,14           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Ago/11         | -                                       | 1,74              | -                                                                   | 1,58  | -                                       | 5,17           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Set/11         | -                                       | 2,26              | -                                                                   | 2,20  | -                                       | 6,00           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Out/11         | -                                       | 2,66              | -                                                                   | 3,49  | -                                       | 6,62           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Nov/11         | -                                       | 2,94              | -                                                                   | 5,17  | -                                       | 7,03           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Dez/11         | -                                       | 3,09              | -                                                                   | 6,99  | -                                       | 7,24           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jan/12         | -                                       | 3,11              | -                                                                   | 8,66  | -                                       | 7,24           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Fev/12         | -                                       | 3,01              | -                                                                   | 9,93  | -                                       | 7,04           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Mar/12         | 22,46                                   | 2,79              | 2,70                                                                | 10,52 | 9,09                                    | 6,63           | 21,34                    | 0,00 | 2,57                                                 | 0,00 | 8,64                                    | 0,00 |
| Abr/12         | 14,48                                   | 2,45              | 1,74                                                                | 10,18 | 5,86                                    | 6,02           | 13,17                    | 0,00 | 1,59                                                 | 0,00 | 5,33                                    | 0,00 |
| Mai/12         | 13,15                                   | 1,98              | 1,58                                                                | 8,64  | 5,32                                    | 5,20           | 12,07                    | 0,00 | 1,45                                                 | 0,00 | 4,88                                    | 0,00 |
| Jun/12         | 5,88                                    | 1,38              | 0,71                                                                | 5,62  | 2,38                                    | 4,17           | 4,23                     | 0,00 | 0,51                                                 | 0,00 | 1,71                                    | 0,00 |
| Total          | 55,97                                   | 29,08             | 6,74                                                                | 78,61 | 22,66                                   | 75,55          | 50,81                    | 0,00 | 6,12                                                 | 0,00 | 20,57                                   | 0,00 |
| Total geral    | 85,05                                   |                   | 85,35                                                               |       | 98,21                                   |                | 50,81                    |      | 6,12                                                 |      | 20,57                                   |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pelo Efluente de Esgoto Tratado – EET; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizante mineral – FM; (-) Mês sem eventos de irrigação subsuperficial; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4.

Tabela 27. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Água de Reservatório Superficial (ARS) no ciclo da cana planta, Campinas-SP.

(Continua)

| Mês/ano        | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |                | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|----------------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
|                | ARS <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | ARS                                                                 | FM    | ARS                                     | FM             | ARS                      | FM   | ARS                                                  | FM   | ARS                                     | FM   |
| ----- T6 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         | ----- T7 ----- |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
| Mai/11         | - <sup>(5)</sup>                        | 0,26              | -                                                                   | 0,37  | -                                       | 0,15           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jun/11         | -                                       | 0,32              | -                                                                   | 3,38  | -                                       | 2,90           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jul/11         | -                                       | 1,09              | -                                                                   | 1,88  | -                                       | 4,14           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Ago/11         | -                                       | 1,74              | -                                                                   | 1,58  | -                                       | 5,17           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Set/11         | -                                       | 2,26              | -                                                                   | 2,20  | -                                       | 6,00           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Out/11         | -                                       | 2,66              | -                                                                   | 3,49  | -                                       | 6,62           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Nov/11         | -                                       | 2,94              | -                                                                   | 5,17  | -                                       | 7,03           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Dez/11         | -                                       | 3,09              | -                                                                   | 6,99  | -                                       | 7,24           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jan/12         | -                                       | 3,11              | -                                                                   | 8,66  | -                                       | 7,24           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Fev/12         | -                                       | 3,01              | -                                                                   | 9,93  | -                                       | 7,04           | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Mar/12         | 1,03                                    | 2,79              | 0,06                                                                | 10,52 | 0,28                                    | 6,63           | 0,91                     | 0,00 | 0,05                                                 | 0,00 | 0,24                                    | 0,00 |
| Abr/12         | 0,70                                    | 2,45              | 0,04                                                                | 10,18 | 0,19                                    | 6,02           | 0,56                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,15                                    | 0,00 |
| Mai/12         | 0,65                                    | 1,98              | 0,04                                                                | 8,64  | 0,17                                    | 5,20           | 0,53                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,14                                    | 0,00 |
| Jun/12         | 0,30                                    | 1,38              | 0,02                                                                | 5,62  | 0,08                                    | 4,17           | 0,18                     | 0,00 | 0,01                                                 | 0,00 | 0,05                                    | 0,00 |
| Total          | 2,69                                    | 29,08             | 0,16                                                                | 78,61 | 0,72                                    | 75,55          | 2,19                     | 0,00 | 0,13                                                 | 0,00 | 0,59                                    | 0,00 |
| Total geral    | 31,77                                   |                   | 78,77                                                               |       | 76,27                                   |                | 2,19                     |      | 0,13                                                 |      | 0,59                                    |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pela Água de Reservatório Superficial – ARS; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizantes minerais – FM; (-) Mês sem eventos de irrigação subsuperficial; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4.

Tabela 27. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Água de Reservatório Superficial (ARS) no ciclo da cana planta, Campinas-SP.

| Mês/ano     | (Conclusão)                             |                   |                                                                     |       |                                         |       |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
|-------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
|             | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|             | ARS <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | ARS                                                                 | FM    | ARS                                     | FM    | ARS                      | FM   | ARS                                                  | FM   | ARS                                     | FM   |
|             | ----- T8 -----                          |                   |                                                                     |       |                                         |       | ----- T9 -----           |      |                                                      |      |                                         |      |
| Mai/11      | - <sup>(5)</sup>                        | 0,26              | -                                                                   | 0,37  | -                                       | 0,15  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jun/11      | -                                       | 0,32              | -                                                                   | 3,38  | -                                       | 2,90  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jul/11      | -                                       | 1,09              | -                                                                   | 1,88  | -                                       | 4,14  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Ago/11      | -                                       | 1,74              | -                                                                   | 1,58  | -                                       | 5,17  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Set/11      | -                                       | 2,26              | -                                                                   | 2,20  | -                                       | 6,00  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Out/11      | -                                       | 2,66              | -                                                                   | 3,49  | -                                       | 6,62  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Nov/11      | -                                       | 2,94              | -                                                                   | 5,17  | -                                       | 7,03  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Dez/11      | -                                       | 3,09              | -                                                                   | 6,99  | -                                       | 7,24  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Jan/12      | -                                       | 3,11              | -                                                                   | 8,66  | -                                       | 7,24  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Fev/12      | -                                       | 3,01              | -                                                                   | 9,93  | -                                       | 7,04  | -                        | 0,00 | -                                                    | 0,00 | -                                       | 0,00 |
| Mar/12      | 1,05                                    | 2,79              | 0,06                                                                | 10,52 | 0,28                                    | 6,63  | 1,02                     | 0,00 | 0,06                                                 | 0,00 | 0,27                                    | 0,00 |
| Abr/12      | 0,67                                    | 2,45              | 0,04                                                                | 10,18 | 0,18                                    | 6,02  | 0,62                     | 0,00 | 0,04                                                 | 0,00 | 0,17                                    | 0,00 |
| Mai/12      | 0,59                                    | 1,98              | 0,04                                                                | 8,64  | 0,16                                    | 5,20  | 0,56                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,15                                    | 0,00 |
| Jun/12      | 0,24                                    | 1,38              | 0,01                                                                | 5,62  | 0,06                                    | 4,17  | 0,20                     | 0,00 | 0,01                                                 | 0,00 | 0,05                                    | 0,00 |
| Total       | 2,56                                    | 29,08             | 0,15                                                                | 78,61 | 0,68                                    | 75,55 | 2,40                     | 0,00 | 0,14                                                 | 0,00 | 0,64                                    | 0,00 |
| Total geral | 31,64                                   |                   | 78,76                                                               |       | 76,23                                   |       | 2,40                     |      | 0,14                                                 |      | 0,64                                    |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pela Água de Reservatório Superficial – ARS; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizantes minerais – FM; (-) Mês sem eventos de irrigação subsuperficial; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4.

Tabela 28. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Efluente de Esgoto Tratado (EET) no ciclo da 1ª soca de cana-de-açúcar, Campinas-SP.

| Mês/ano        | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
|                | EET <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | EET                                                                 | FM    | EET                                     | FM    | EET                      | FM   | EET                                                  | FM   | EET                                     | FM   |
| ----- T2 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         |       | ----- T3 -----           |      |                                                      |      |                                         |      |
| Nov/12         | 16,44                                   | 3,70              | 2,39                                                                | 1,64  | 7,46                                    | 3,08  | 18,43                    | 0,00 | 2,68                                                 | 0,00 | 8,36                                    | 0,00 |
| Dez/12         | 8,27                                    | 1,67              | 1,20                                                                | 2,10  | 3,75                                    | 1,50  | 10,06                    | 0,00 | 1,46                                                 | 0,00 | 4,56                                    | 0,00 |
| Jan/13         | 5,46                                    | 6,58              | 0,87                                                                | 3,01  | 2,46                                    | 6,16  | 1,52                     | 0,00 | 0,24                                                 | 0,00 | 0,69                                    | 0,00 |
| Fev/13         | 7,96                                    | 5,53              | 1,34                                                                | 2,94  | 3,58                                    | 5,88  | 3,20                     | 0,00 | 0,54                                                 | 0,00 | 1,44                                    | 0,00 |
| Mar/13         | 8,81                                    | 5,44              | 1,33                                                                | 3,17  | 3,63                                    | 6,16  | 1,59                     | 0,00 | 0,24                                                 | 0,00 | 0,65                                    | 0,00 |
| Abr/13         | 23,63                                   | 0,00              | 3,37                                                                | 1,19  | 9,41                                    | 0,21  | 17,13                    | 0,00 | 2,44                                                 | 0,00 | 6,82                                    | 0,00 |
| Mai/13         | 25,76                                   | 0,00              | 3,63                                                                | 2,32  | 5,52                                    | 5,36  | 16,40                    | 0,00 | 2,31                                                 | 0,00 | 3,52                                    | 0,00 |
| Jun/13         | 11,00                                   | 0,00              | 2,78                                                                | 6,55  | 3,40                                    | 12,38 | 7,10                     | 0,00 | 1,79                                                 | 0,00 | 2,20                                    | 0,00 |
| Total          | 107,33                                  | 22,92             | 16,91                                                               | 22,91 | 39,22                                   | 40,73 | 75,43                    | 0,00 | 11,70                                                | 0,00 | 28,24                                   | 0,00 |
| Total geral    | 130,25                                  |                   | 39,82                                                               |       | 79,95                                   |       | 75,43                    |      | 11,70                                                |      | 28,24                                   |      |
| ----- T4 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         |       | ----- T5 -----           |      |                                                      |      |                                         |      |
| Nov/12         | 25,91                                   | 3,70              | 3,76                                                                | 1,64  | 11,76                                   | 3,08  | 30,08                    | 0,00 | 4,37                                                 | 0,00 | 13,65                                   | 0,00 |
| Dez/12         | 7,20                                    | 0,00              | 1,05                                                                | 1,05  | 3,27                                    | 0,00  | 11,73                    | 0,00 | 1,70                                                 | 0,00 | 5,32                                    | 0,00 |
| Jan/13         | 9,32                                    | 0,00              | 1,48                                                                | 2,39  | 4,20                                    | 2,10  | 5,44                     | 0,00 | 0,87                                                 | 0,00 | 2,45                                    | 0,00 |
| Fev/13         | 11,65                                   | 0,00              | 1,96                                                                | 2,31  | 5,25                                    | 4,21  | 11,33                    | 0,00 | 1,91                                                 | 0,00 | 5,11                                    | 0,00 |
| Mar/13         | 10,41                                   | 0,00              | 1,58                                                                | 2,93  | 4,29                                    | 5,51  | 3,71                     | 0,00 | 0,56                                                 | 0,00 | 1,53                                    | 0,00 |
| Abr/13         | 29,76                                   | 0,00              | 4,24                                                                | 0,32  | 11,86                                   | 0,00  | 29,76                    | 0,00 | 4,24                                                 | 0,00 | 11,86                                   | 0,00 |
| Mai/13         | 28,57                                   | 0,00              | 4,03                                                                | 1,92  | 6,13                                    | 2,53  | 29,29                    | 0,00 | 4,13                                                 | 0,00 | 6,28                                    | 0,00 |
| Jun/13         | 9,02                                    | 0,00              | 2,28                                                                | 7,05  | 2,79                                    | 12,99 | 7,10                     | 0,00 | 1,79                                                 | 0,00 | 2,20                                    | 0,00 |
| Total          | 131,86                                  | 3,70              | 20,38                                                               | 19,62 | 49,53                                   | 30,42 | 128,45                   | 0,00 | 19,57                                                | 0,00 | 48,39                                   | 0,00 |
| Total geral    | 135,56                                  |                   | 39,99                                                               |       | 79,95                                   |       | 128,45                   |      | 19,57                                                |      | 48,39                                   |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pelo Efluente de Esgoto Tratado – EET; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizante mineral – FM; T2= EET-CN-0,2; T3= EET-SN-0,2; T4= EET-CN-0,4; T5= EET-SN-0,4.

Tabela 29. Quantidade de nutrientes aplicado mensalmente via fertirrigação em sistema de irrigação subsuperficial utilizando Água de Reservatório Superficial (ARS) no ciclo da 1ª soca de cana-de-açúcar, Campinas-SP.

| Mês/ano        | N <sup>(1)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |                   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup> (kg ha <sup>-1</sup> ) |       | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |                | N (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> ) |      | K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> ) |      |
|----------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------|----------------|--------------------------|------|------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------|------|
|                | ARS <sup>(3)</sup>                      | FM <sup>(4)</sup> | ARS                                                                 | FM    | ARS                                     | FM             | ARS                      | FM   | ARS                                                  | FM   | ARS                                     | FM   |
| ----- T6 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         | ----- T7 ----- |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
| Nov/12         | 0,48                                    | 10,37             | 0,08                                                                | 4,12  | 0,45                                    | 8,06           | 0,58                     | 0,00 | 0,10                                                 | 0,00 | 0,55                                    | 0,00 |
| Dez/12         | 0,31                                    | 9,62              | 0,05                                                                | 3,25  | 0,30                                    | 6,98           | 0,23                     | 0,00 | 0,04                                                 | 0,00 | 0,22                                    | 0,00 |
| Jan/13         | 0,07                                    | 11,97             | 0,04                                                                | 3,84  | 0,22                                    | 8,40           | 0,03                     | 0,00 | 0,01                                                 | 0,00 | 0,08                                    | 0,00 |
| Fev/13         | 0,07                                    | 13,41             | 0,04                                                                | 4,24  | 0,22                                    | 9,24           | 0,06                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,17                                    | 0,00 |
| Mar/13         | 0,09                                    | 14,17             | 0,05                                                                | 4,46  | 0,16                                    | 9,63           | 0,02                     | 0,00 | 0,01                                                 | 0,00 | 0,05                                    | 0,00 |
| Abr/13         | 0,19                                    | 14,16             | 0,12                                                                | 4,43  | 0,26                                    | 9,36           | 0,17                     | 0,00 | 0,11                                                 | 0,00 | 0,23                                    | 0,00 |
| Mai/13         | 0,15                                    | 17,65             | 0,16                                                                | 5,79  | 0,21                                    | 10,68          | 0,18                     | 0,00 | 0,11                                                 | 0,00 | 0,24                                    | 0,00 |
| Jun/13         | 0,08                                    | 27,11             | 0,01                                                                | 9,32  | 0,07                                    | 15,71          | 0,05                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,07                                    | 0,00 |
| Total          | 1,44                                    | 118,47            | 0,54                                                                | 39,45 | 1,89                                    | 78,06          | 1,30                     | 0,00 | 0,44                                                 | 0,00 | 1,60                                    | 0,00 |
| Total geral    | 119,91                                  |                   | 39,99                                                               |       | 79,95                                   |                | 1,30                     |      | 0,44                                                 |      | 1,60                                    |      |
| ----- T8 ----- |                                         |                   |                                                                     |       |                                         | ----- T9 ----- |                          |      |                                                      |      |                                         |      |
| Nov/12         | 0,60                                    | 10,25             | 0,10                                                                | 4,10  | 0,57                                    | 7,94           | 0,65                     | 0,00 | 0,11                                                 | 0,00 | 0,61                                    | 0,00 |
| Dez/12         | 0,35                                    | 9,58              | 0,06                                                                | 3,25  | 0,33                                    | 6,95           | 0,25                     | 0,00 | 0,04                                                 | 0,00 | 0,24                                    | 0,00 |
| Jan/13         | 0,10                                    | 11,94             | 0,05                                                                | 3,83  | 0,31                                    | 8,31           | 0,03                     | 0,00 | 0,02                                                 | 0,00 | 0,10                                    | 0,00 |
| Fev/13         | 0,13                                    | 13,35             | 0,06                                                                | 4,21  | 0,39                                    | 9,07           | 0,09                     | 0,00 | 0,04                                                 | 0,00 | 0,27                                    | 0,00 |
| Mar/13         | 0,10                                    | 14,17             | 0,04                                                                | 4,46  | 0,24                                    | 9,55           | 0,02                     | 0,00 | 0,01                                                 | 0,00 | 0,07                                    | 0,00 |
| Abr/13         | 0,25                                    | 14,11             | 0,16                                                                | 4,39  | 0,34                                    | 9,29           | 0,17                     | 0,00 | 0,11                                                 | 0,00 | 0,23                                    | 0,00 |
| Mai/13         | 0,21                                    | 17,56             | 0,16                                                                | 5,79  | 0,33                                    | 10,55          | 0,18                     | 0,00 | 0,12                                                 | 0,00 | 0,25                                    | 0,00 |
| Jun/13         | 0,08                                    | 27,11             | 0,05                                                                | 9,28  | 0,11                                    | 15,67          | 0,05                     | 0,00 | 0,03                                                 | 0,00 | 0,06                                    | 0,00 |
| Total          | 1,83                                    | 118,08            | 0,69                                                                | 39,31 | 2,62                                    | 77,33          | 1,44                     | 0,00 | 0,48                                                 | 0,00 | 1,84                                    | 0,00 |
| Total geral    | 119,91                                  |                   | 39,99                                                               |       | 79,95                                   |                | 1,44                     |      | 0,48                                                 |      | 1,84                                    |      |

<sup>(1)</sup> Nitrogênio total; <sup>(2)</sup> Fósforo total; <sup>(3)</sup> Fornecimento de nutrientes pela Água de Reservatório Superficial – ARS; <sup>(4)</sup> Fornecimento de nutrientes por fertilizantes minerais – FM; T6= ARS-CN-0,2; T7= ARS-SN-0,2; T8= ARS-CN-0,4; T9= ARS-SN-0,4.

## 9.2 Salinidade e sodicidade do solo

Tabela 30. Análise de variância para pH, condutividade elétrica (CE), porcentagem de sódio trocável (PST, %) e razão de absorção de sódio (RAS,  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) no início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

(Continua)

| Fator/nível             |     | Início do ciclo                |                    |                        |                    | Final do ciclo                 |                    |                    |                    |
|-------------------------|-----|--------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                         |     | pH                             | CE                 | PST                    | RAS                | pH                             | CE                 | PST                | RAS                |
|                         |     | ----- Camada 0,0 - 0,2 m ----- |                    |                        |                    | ----- Camada 0,0 - 0,2 m ----- |                    |                    |                    |
| <b>Qualidade (Q)</b>    | EET | 5,52                           | 0,333              | 0,073                  | 0,013              | 5,43                           | 0,133              | 0,072              | 0,015              |
|                         | ARS | 5,68                           | 0,288              | 0,075                  | 0,013              | 5,55                           | 0,133              | 0,065              | 0,012              |
| Teste F para Q          |     | 2,78 <sup>ns</sup>             | 0,38 <sup>ns</sup> | 0,10 <sup>ns</sup>     | 0,00 <sup>ns</sup> | 3,59 <sup>ns</sup>             | 0,00 <sup>ns</sup> | 0,29 <sup>ns</sup> | 1,33 <sup>ns</sup> |
| <b>Profundidade (P)</b> | 0,2 | 5,58                           | 0,310              | 0,082 a <sup>(2)</sup> | 0,012              | 5,45                           | 0,132              | 0,077              | 0,015              |
|                         | 0,4 | 5,62                           | 0,312              | 0,067 b                | 0,015              | 5,53                           | 0,135              | 0,060              | 0,012              |
| Teste F para P          |     | 0,11 <sup>ns</sup>             | 0,00 <sup>ns</sup> | 7,84*                  | 1,09 <sup>ns</sup> | 1,83 <sup>ns</sup>             | 0,04 <sup>ns</sup> | 1,79 <sup>ns</sup> | 1,33 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P      |     | 0,44 <sup>ns</sup>             | 0,33 <sup>ns</sup> | 0,87 <sup>ns</sup>     | 1,09 <sup>ns</sup> | 5,93*                          | 0,04 <sup>ns</sup> | 7,14*              | 5,33 <sup>ns</sup> |
| CV <sup>(1)</sup>       |     | 3,09                           | 40,65              | 12,51                  | 41,46              | 1,94                           | 20,95              | 31,61              | 37,50              |
| Média Geral             |     | 5,60                           | 0,311              | 0,074                  | 0,013              | 5,49                           | 0,133              | 0,068              | 0,013              |
|                         |     | ----- Camada 0,2 - 0,4 m ----- |                    |                        |                    | ----- Camada 0,2 - 0,4 m ----- |                    |                    |                    |
| <b>Qualidade (Q)</b>    | EET | 5,60                           | 0,282              | 0,087                  | 0,018              | 5,50 b                         | 0,090              | 0,070              | 0,018              |
|                         | ARS | 5,70                           | 0,228              | 0,073                  | 0,013              | 5,67 a                         | 0,095              | 0,073              | 0,010              |
| Teste F para Q          |     | 0,74 <sup>ns</sup>             | 1,23 <sup>ns</sup> | 1,59 <sup>ns</sup>     | 2,46 <sup>ns</sup> | 10,71*                         | 0,23 <sup>ns</sup> | 0,06 <sup>ns</sup> | 1,92 <sup>ns</sup> |
| <b>Profundidade (P)</b> | 0,2 | 5,65                           | 0,268              | 0,085                  | 0,017              | 5,53                           | 0,092              | 0,080              | 0,018              |
|                         | 0,4 | 5,65                           | 0,242              | 0,075                  | 0,015              | 5,63                           | 0,093              | 0,063              | 0,010              |
| Teste F para P          |     | 0,00 <sup>ns</sup>             | 0,31 <sup>ns</sup> | 0,89 <sup>ns</sup>     | 0,03 <sup>ns</sup> | 3,86 <sup>ns</sup>             | 0,03 <sup>ns</sup> | 1,59 <sup>ns</sup> | 1,92 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P      |     | 0,00 <sup>ns</sup>             | 0,39 <sup>ns</sup> | 0,89 <sup>ns</sup>     | 0,03 <sup>ns</sup> | 3,86 <sup>ns</sup>             | 0,63 <sup>ns</sup> | 3,11 <sup>ns</sup> | 1,92 <sup>ns</sup> |
| CV                      |     | 3,58                           | 32,63              | 22,92                  | 34,91              | 1,58                           | 19,66              | 31,97              | 73,47              |
| Média Geral             |     | 5,65                           | 0,255              | 0,080                  | 0,016              | 5,58                           | 0,093              | 0,072              | 0,014              |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade;

<sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Tabela 30. Análise de variância para pH, condutividade elétrica (CE), porcentagem de sódio trocável (PST, %) e razão de absorção de sódio (RAS, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) no início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.

(Continuação)

| Fator/nível                    |     | Início do ciclo    |                    |                    |                    | Final do ciclo     |                    |                    |                    |
|--------------------------------|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                |     | pH                 | CE                 | PST                | RAS                | pH                 | CE                 | PST                | RAS                |
| ----- Camada 0,4 - 0,6 m ----- |     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Qualidade (Q)</b>           | EET | 5,68               | 0,210              | 0,097              | 0,017              | 5,57               | 0,067              | 0,122              | 0,023              |
|                                | ARS | 5,80               | 0,167              | 0,080              | 0,013              | 5,70               | 0,067              | 0,083              | 0,015              |
| Teste F para Q                 |     | 1,26 <sup>ns</sup> | 1,40 <sup>ns</sup> | 1,71 <sup>ns</sup> | 1,33 <sup>ns</sup> | 1,83 <sup>ns</sup> | 0,00 <sup>ns</sup> | 1,61 <sup>ns</sup> | 1,71 <sup>ns</sup> |
| <b>Profundidade (P)</b>        | 0,2 | 5,73               | 0,195              | 0,093              | 0,017              | 5,60               | 0,065              | 0,128              | 0,023              |
|                                | 0,4 | 5,75               | 0,182              | 0,083              | 0,013              | 5,67               | 0,068              | 0,077              | 0,015              |
| Teste F para P                 |     | 0,03 <sup>ns</sup> | 0,13 <sup>ns</sup> | 0,61 <sup>ns</sup> | 1,33 <sup>ns</sup> | 0,46 <sup>ns</sup> | 1,09 <sup>ns</sup> | 2,92 <sup>ns</sup> | 1,71 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P             |     | 0,03 <sup>ns</sup> | 0,03 <sup>ns</sup> | 3,34 <sup>ns</sup> | 1,33 <sup>ns</sup> | 1,83 <sup>ns</sup> | 1,09 <sup>ns</sup> | 0,68 <sup>ns</sup> | 0,61 <sup>ns</sup> |
| CV <sup>(1)</sup>              |     | 3,14               | 33,72              | 25,03              | 33,33              | 3,03               | 8,29               | 51,14              | 57,68              |
| Média Geral                    |     | 5,74               | 0,188              | 0,088              | 0,015              | 5,63               | 0,067              | 0,103              | 0,019              |
| ----- Camada 0,6 - 0,8 m ----- |     |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
| <b>Qualidade (Q)</b>           | EET | 5,67               | 0,171              | 0,103              | 0,018              | 5,53               | 0,062              | 0,145              | 0,027              |
|                                | ARS | 5,78               | 0,157              | 0,095              | 0,015              | 5,72               | 0,053              | 0,100              | 0,017              |
| Teste F para Q                 |     | 0,95 <sup>ns</sup> | 0,45 <sup>ns</sup> | 0,47 <sup>ns</sup> | 1,50 <sup>ns</sup> | 1,12 <sup>ns</sup> | 2,59 <sup>ns</sup> | 1,69 <sup>ns</sup> | 3,48 <sup>ns</sup> |
| <b>Profundidade (P)</b>        | 0,2 | 5,70               | 0,180              | 0,098              | 0,017              | 5,60               | 0,058              | 0,140              | 0,025              |
|                                | 0,4 | 5,75               | 0,148              | 0,100              | 0,017              | 5,65               | 0,057              | 0,107              | 0,018              |
| Teste F para P                 |     | 0,17 <sup>ns</sup> | 2,00 <sup>ns</sup> | 0,02 <sup>ns</sup> | 0,00 <sup>ns</sup> | 0,08 <sup>ns</sup> | 0,10 <sup>ns</sup> | 0,09 <sup>ns</sup> | 1,55 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P             |     | 0,48 <sup>ns</sup> | 0,45 <sup>ns</sup> | 1,51 <sup>ns</sup> | 1,50 <sup>ns</sup> | 2,09 <sup>ns</sup> | 0,93 <sup>ns</sup> | 0,00 <sup>ns</sup> | 0,00 <sup>ns</sup> |
| CV                             |     | 3,62               | 23,61              | 21,33              | 28,28              | 5,34               | 15,61              | 50,40              | 42,83              |
| Média Geral                    |     | 5,73               | 0,164              | 0,099              | 0,017              | 5,63               | 0,058              | 0,123              | 0,022              |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade;

<sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 30. Análise de variância para pH, condutividade elétrica (CE), porcentagem de sódio trocável (PST, %) e razão de absorção de sódio (RAS, mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) no início e final da 1ª soca da cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distroférico, Campinas-SP.

(Conclusão)

| Fator/nível        |     | Início do ciclo                |                    |                        |                    | Final do ciclo                 |                    |                    |                    |
|--------------------|-----|--------------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                    |     | pH                             | CE                 | PST                    | RAS                | pH                             | CE                 | PST                | RAS                |
|                    |     | ----- Camada 0,8 - 1,0 m ----- |                    |                        |                    | ----- Camada 0,8 - 1,0 m ----- |                    |                    |                    |
| Qualidade (Q)      | EET | 5,67                           | 0,171              | 0,103 a <sup>(2)</sup> | 0,020              | 5,62                           | 0,082 a            | 0,117              | 0,028              |
|                    | ARS | 5,80                           | 0,145              | 0,083 b                | 0,015              | 5,68                           | 0,057 b            | 0,093              | 0,017              |
| Teste F para Q     |     | 0,84 <sup>ns</sup>             | 1,00 <sup>ns</sup> | 6,35*                  | 3,86 <sup>ns</sup> | 0,10 <sup>ns</sup>             | 19,27*             | 0,84 <sup>ns</sup> | 5,44 <sup>ns</sup> |
| Profundidade (P)   | 0,2 | 5,75                           | 0,172              | 0,100                  | 0,018              | 5,60                           | 0,083 a            | 0,085              | 0,022              |
|                    | 0,4 | 5,72                           | 0,145              | 0,087                  | 0,017              | 5,70                           | 0,055 b            | 0,125              | 0,023              |
| Teste F para P     |     | 0,05 <sup>ns</sup>             | 1,00 <sup>ns</sup> | 2,82 <sup>ns</sup>     | 0,43 <sup>ns</sup> | 0,23 <sup>ns</sup>             | 24,77*             | 2,47 <sup>ns</sup> | 0,11 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P |     | 0,05 <sup>ns</sup>             | 0,39 <sup>ns</sup> | 2,82 <sup>ns</sup>     | 3,86 <sup>ns</sup> | 0,92 <sup>ns</sup>             | 2,14 <sup>ns</sup> | 4,38 <sup>ns</sup> | 2,79 <sup>ns</sup> |
| CV <sup>(1)</sup>  |     | 4,39                           | 29,11              | 14,73                  | 25,20              | 6,39                           | 14,26              | 42,03              | 38,49              |
| Média Geral        |     | 5,73                           | 0,158              | 0,093                  | 0,018              | 5,65                           | 0,069              | 0,105              | 0,023              |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade;

<sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

### 9.3 Desempenho tecnológico e produtividade da cana-de-açúcar

Tabela 31. Análise de variância para estimativa de produção de colmo (EPC, t ha<sup>-1</sup>) e rendimento teórico de açúcar recuperável (RTR, t ha<sup>-1</sup>) em função da qualidade de água empregada (efluente de esgoto tratado – EET, ou água de reservatório superficial – ARS), profundidade de instalação do tubo gotejador (0,2 e 0,4 m) e fertirrigação (com ou sem) para dois ciclos de cana-de-açúcar (cana planta e 1ª soca) em Latossolo Vermelho distroférrico, Campinas-SP.

| Fator/nível             | Cana planta             |                    | 1ª soca            |                    |
|-------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                         | EPC                     | RTR                | EPC                | RTR                |
| <b>Qualidade (Q)</b>    |                         |                    |                    |                    |
| EET                     | 196,54                  | 26,94              | 236,41             | 35,13              |
| ARS                     | 205,42                  | 29,25              | 216,86             | 32,40              |
| Teste F para Q          | 1,47 <sup>ns</sup>      | 3,58 <sup>ns</sup> | 3,53 <sup>ns</sup> | 3,09 <sup>ns</sup> |
| <b>Profundidade (P)</b> |                         |                    |                    |                    |
| 0,2                     | 185,55 b <sup>(2)</sup> | 26,64 b            | 226,45             | 33,94              |
| 0,4                     | 216,41 a                | 29,55 a            | 226,81             | 33,59              |
| Teste F para P          | 17,78*                  | 5,70*              | 0,01 <sup>ns</sup> | 0,05 <sup>ns</sup> |
| <b>Fertilidade (F)</b>  |                         |                    |                    |                    |
| Com                     | 210,80 a                | 29,83 a            | 228,62             | 34,67              |
| Sem                     | 191,16 b                | 26,36 b            | 224,65             | 32,86              |
| Teste F para F          | 7,20*                   | 8,12*              | 0,15 <sup>ns</sup> | 1,37 <sup>ns</sup> |
| <b>Interação</b>        |                         |                    |                    |                    |
| Teste F para Q x P      | 0,19 <sup>ns</sup>      | 2,06 <sup>ns</sup> | 0,04 <sup>ns</sup> | 0,20 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x F      | 8,42*                   | 5,72*              | 0,10 <sup>ns</sup> | 0,28 <sup>ns</sup> |
| Teste F para P x F      | 0,97 <sup>ns</sup>      | 0,55 <sup>ns</sup> | 0,70 <sup>ns</sup> | 0,31 <sup>ns</sup> |
| Teste F para Q x P x F  | 0,10 <sup>ns</sup>      | 1,91 <sup>ns</sup> | 0,14 <sup>ns</sup> | 0,09 <sup>ns</sup> |
| CV <sup>(1)</sup>       | 11,52                   | 13,72              | 14,52              | 14,51              |
| Média Geral             | 200,98                  | 28,09              | 226,63             | 33,76              |

<sup>(1)</sup> Coeficiente de variação em porcentagem; \* teste F significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> teste F não significativo ao nível de 5% de probabilidade; <sup>(2)</sup> Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.